

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

НЕМИРОВСЬКИЙ ЯКІВ БОРИСОВИЧ

УДК 621.787.4

**НАУКОВІ ОСНОВИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ТОЧНОСТІ ПРИ ДЕФОРМУЮЧОМУ ПРОТЯГУВАННІ**

Спеціальність 05.02.08 – Технологія машинобудування

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі металорізальних верстатів та систем Центральноукраїнського національного технічного університету та у відділі №20 «Перспективних ресурсозберігаючих технологій обробки» Інституту надтвердих матеріалів імені В.Н. Бакуля.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Посвятенко Едуард Карпович,
Національний транспортний університет
Міністерства освіти і науки України, професор
кафедри виробництва, ремонту та
матеріалознавства

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Киричок Петро Олексійович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського», проректор з науково-педагогічної
роботи

доктор технічних наук, професор
Пермяков Олександр Анатолійович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
завідувач кафедри технології машинобудування
та металорізальних верстатів

доктор технічних наук, професор
Грушко Олександр Володимирович,
Вінницький національний технічний
університет, професор кафедри опору
матеріалів та прикладної механіки

Захист відбудеться «20» лютого 2018 р. о 15⁰⁰ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.26.002.11 в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37, навчальний корпус №1, аудиторія 214.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «11» січня 2018 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради Д26.002.11



О.С. Ганпанцурова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи.

Одним із основних завдань сучасного машинобудування є розробка та впровадження ресурсозберігаючих технологій і підвищення якості виробів. Деформуюче протягування (ДПР) застосовується як чорнова, так і чистова операція, включаючи в собі процеси формоутворення та деформаційного зміцнення.

В наш час створені наукові основи процесу ДПР, як процесу холодного пластичного деформування. Вивчені з цих позицій шорсткість, глибина та ступінь наклепу, ресурс використаної пластичності. Одним з найменш вивчених параметрів якості є точність. Недостатня вивченість цього питання обумовлена тим, що до сих пір не виявлені основні закономірності механіки пластичного деформування, які визначають причини утворення геометричних похибок.

Якщо ДПР є фінішною операцією, то вона відповідальна за розмір отвору та похибки готової деталі. Коли вона є чорною формоутворюючою операцією, точність обробленого отвору визначає припуск під наступну механічну обробку. У цьому випадку необхідно уточнити існуючі моделі по визначенню граничних деформацій при ДПР. Крім того, при деформуванні різнотовщинних деталей осьові деформації тонкостінної ділянки відрізняються від осьових деформацій товстостінної ділянки. Це приводить до утворення такого виду похибки, як викривлення осі деталі.

Тому при використанні ДПР для обробки глибоких отворів у таких деталях, як гідроциліндри, циліндри амортизаторів та нафтових насосів, шахтних стійок, хвилеводів, камер спецпризначення та ін., до яких пред'являють жорсткі вимоги по точності обробки (точність не вище 7-го квалітету, викривлення осі не більше 1 мм на метр довжини) виникає проблема забезпечення їх точності.

Ряд порожнистих осесиметричних деталей типу поршневих пальців зношуються в процесі експлуатації, змінюючи свій жорстко регламентований розмір. Операцію ДПР доцільно використовувати для відновлення їх розмірної точності. Для цього важливо протягуванням забезпечити необхідну пластичну зміну розмірів зношеної деталі.

Стає очевидним, що для ефективного впровадження та застосування в промисловості високопродуктивного процесу ДПР необхідно детальне вивчення питань забезпечення точності обробки. Рішення цієї проблеми, що є актуальною науково-технічною задачею і має важливе значення для розвитку науки та техніки полягає в теоретичному дослідженні механіки деформуючого протягування, визначення на цій основі причин утворення геометричних похибок та створення наукових основ технологічного управління параметрами точності оброблених деталей.

Зв'язок роботи з науковими програмами, темами.

Робота виконувалась на кафедрі «Металорізальні верстати та системи» Центральноукраїнського національного технічного університету і пов'язана з тематикою науково-дослідної роботи кафедри на тему «Підвищення

ефективності комбінованого протягування отворів деталей із чавунів» державний реєстраційний номер 0113U003088; «Теоретична оцінка впливу вихідних неточностей стволів на викривлення осі виробу», державний реєстраційний номер 0117U003576 та «Підвищення ефективності процесів механічної обробки та інструментів», державний реєстраційний номер 0116U008173, а також пов'язана з фундаментальними та науково-дослідними роботами, які виконувались у ІНМ НАН України ім В.М. Бакуля на тему «Разработать и освоить в производстве малоотходные технологические процессы восстановления крестовин трансмиссий и поршневых пальцев ДВС», державний реєстраційний номер 01870006678; «Создать высокоэффективный деформирующий инструмент для обработки отверстий нежестких изделий большой длины типа волноводов, обеспечивающий повышение производительности обработки в 2–5 раз и снижение электрических потерь в 1,5–2 раза», державний реєстраційний номер 81081587; договір №2280 з Дніпропетровським тепловозремонтним заводом «Разработать и освоить в производстве малоотходный технологический процесс восстановления поршневых пальцев ДВС».

Мета роботи і задачі дослідження.

Розробка науково-обґрунтованих технологічних методів управління параметрами точності для забезпечення необхідної геометричної точності виробів, оброблених деформуючим протягуванням.

Для досягнення поставленої мети сформульовані наступні задачі:

1. Розробити теоретичну модель осередку деформації при ДПР, що дозволяє вивчити його кінематичні, геометричні й енергетичні параметри.
2. Встановити особливості осьових деформацій оброблених заготовок та вплив на них технологічних факторів процесу.
3. Розробити математичну модель протягування різновисотних деталей і вивчити закономірності їх деформування.
4. Встановити особливості формування геометричних похибок при деформуванні деталей із малими натягами.
5. На основі теоретичних та експериментальних досліджень: деформованого стану осередку деформації і деформацій оброблених деталей встановити закономірності формування геометричних похибок.
6. Розробити технологічні процеси обробки, схеми деформування, конструкції інструментів, що забезпечують досягнення необхідних параметрів точності деталей.
7. Визначити та систематизувати технологічні способи управління параметрами точності при деформуючому протягуванні; розробити алгоритми управління цими параметрами для побудови технологічних процесів на основі деформуючого протягування.
8. Провести промислову апробацію та реалізацію результатів дослідження.

Об'єктом дослідження є технологічний процес деформуючого протягування.

Предметом дослідження є комплекс параметрів геометричної точності виробів, оброблених деформуючим протягуванням.

Методи досліджень.

При виконанні роботи використовувалася загальнонаукова

методологія, яка характеризується:

- системністю, що представила вивчення точності, як створення системи знань, що включають теоретичні та експериментальні дослідження механіки процесу, які дозволили встановити основні причини формування похибок при ДПР, визначити шляхи управління параметрами точності та реалізувати їх у конкретних технологічних та конструктивних рішеннях.

Дослідження базуються на використанні сучасних технологій статистичного, комп'ютерного моделювання, механіки течії деформованого твердого тіла, варіаційних принципів, теорії пластичності та пружності, диференціального та інтегрального обрахунків, статистичної обробки експериментальних даних, теорії подібності, що в цілому забезпечило коректність постановки та рішення задач, а також адекватність отриманих математичних та інтерполяційних моделей.

Наукова новизна роботи.

Вперше створені наукові основи технологічного управління параметрами точності при деформуючому протягуванні деталей, які полягають:

- в розробці математичної моделі осередку деформації, яка дозволила встановити закономірності течії матеріалу в ньому, а саме: в зоні контакту потужність деформування має чітко виражений мінімум при коефіцієнті осьової деформації $K = 0.5$, тому процес деформування має стійкий характер; в позаконтактних зонах мінімум потужності відповідає широкому діапазону зміни $K = 0.4 \div 2.3$, тобто кінематичні параметри в цих зонах мають більше число степенів свободи, отже процес деформування носить явно виражений нестійкий характер, що приводить до виникнення геометричних похибок;

- в експериментальному встановленні варіації осьових деформацій ділянок різновтовщинних в окружному напрямку заготовок та розробці аналітично-експериментальної моделі викривлення осі оброблених деталей, яка дозволила встановити технологічні шляхи мінімізації величини цієї похибки;

- вперше розроблена теоретична модель деформування різновтовщинних заготовок, яка дозволила врахувати вплив різновтовщинності на вибір мінімально необхідної деформації, яка забезпечує пластичне деформування всього об'єму заготовки;

- вперше експериментально доведено, що досягнення контактним тиском критичного значення $q_{кр}$ якісно змінює схему формоутворення заготовки - переходом укорочення до видовження; при цьому спостерігається вплив оброблюваного матеріалу на довжину контакту та осьові деформації; встановлено, що для випадку осьового подовження при деформуванні з кутами $\alpha > 6^\circ$ змінюється відома залежність контактного тиску від натягу, а саме зі збільшенням натягу контактний тиск зростає;

- вперше розроблена теоретична модель деформування нерівножорсткої деталі, що має в поперечному перерізі жорсткі та пластичні ділянки та забезпечує мінімізацію похибок обробленої деталі зі значним перепадом товщини стінки в поперечному перерізі;

- вперше при використанні розробленої математичної моделі осередку

деформації виконано енергетичний аналіз потужності формоутворення заготовки W та її складових: потужності тертя - W_{mp} , потужності деформування на ділянці контакту - W_2 , потужності деформування позаконтактних зон - $W_{в.з.}$; встановлено, що величина відносної потужності тертя W_{mp}/W інваріантна до режимів обробки і розмірів заготовки та визначається тільки коефіцієнтом тертя та кутом нахилу твірної робочого конусу інструмента α .

Практичне значення одержаних результатів.

1. Розроблено науково-обґрунтовані схеми та способи ДПР, конструкції інструментів і алгоритми побудови технологічних процесів, що забезпечують підвищення точності обробки.
2. Розроблено методику проектування операції ДПР, що дозволяє забезпечити необхідну осьову деформацію заготовки.
3. Розроблено методику визначення мінімально необхідної деформації при обробці різнотовщинних деталей, що забезпечує відсутність браку по параметрам різнотовщинності, вичерпання ресурсу пластичності, втрати стійкості течії матеріалу.
4. Розроблено методику оцінки конструкційної міцності твердосплавних деформуючих елементів при їх експлуатації в умовах масового виробництва, яка дозволяє оцінити їх міцність при складному напруженому стані, з урахуванням масштабного ефекту, неоднорідності напруженого стану стосовно до твердих сплавів, які по різному опираються при зміні показника напруженого стану.
5. Розроблений технологічний процес обробки отворів у гільзах із сірого чавуну, що дозволило одержати робочу поверхню виробу з поліпшеними механічними, трибологічними та експлуатаційними характеристиками.
6. Розроблений технологічний процес відновлення геометричної розмірної точності поршневих пальців ДВС при цьому, вирішена задача по отриманню відновлених пальців з показниками якості на рівні нових.
7. Розроблений технологічний процес обробки різнотовщинних деталей, реалізований при обробці заготовок стволів та хвильоводних вигинів із латуні Л63 та міді М1.
8. Розроблена ремонтпридатна конструкція розширювача для буріння гірських порід та технологічний процес відновлення його розмірної точності.
9. Розроблений комбінований інструмент для обробки отворів у корпусі гідророзподільника із сірого чавуну СЧ20 з використанням деформуючого протягування.

Результати роботи пройшли промислову апробацію і лягли в основу промислової розробки ресурсозберігаючих технологічних процесів обробки різнотовщинних заготовок стволів, хвильоводних вигинів, гільз ДВС із чавуну, техпроцесів відновлення геометричної точності поршневих пальців

ДВС, розширювачів для алмазного буріння, а також конструкції комбінованої протяжки для обробки отворів у втулках із чавуну. Впроваджені: при обробці внутрішньої порожнини заготовок хвильоводних вигинів, на Київському 3-м авторемонтному заводі при обробці гільз ДВС із чавуну, на Ташкентському заводі Ташормз, Дніпропетровському тепловозремонтному заводі при відновленні геометричної точності поршневих пальців ДВС, на НКГРЕ м. Норильськ при відновленні геометричної точності розширювачів для алмазного буріння, на підприємстві ПАТ НВФ «Радій», м. Кропивницький при обробці отворів у корпусі гідророзподільника та на підприємствах Укроборонпрому при обробці отворів в спеціальних різнотовщинних деталях.

Особистий внесок здобувача.

Автор безпосередньо брав участь у проведенні всіх експериментів і в обробці експериментальних даних. Постановка теоретичних завдань і обговорення результатів експериментальних і теоретичних досліджень проводилася з науковим консультантом цієї роботи. При рішенні задач технологічної механіки деформуючого протягування проводились наукові консультації з професором Вороніжського архітектурно-будівельного університету Ю.А. Цехановим. Автором розроблена математична модель осередку деформації, встановлені особливості течії матеріалу в ньому, визначені параметри осередку деформації (1, 9, 13, 16, 22, 23, 26, 42), розроблені та удосконалені методики: виміру осьових напруг у стінці заготовки, теоретичного уточнення точності визначення довжини контакту, визначення коефіцієнта тертя, (29, 32, 34, 39). Сформульовано завдання, сплановані експерименти по визначенню деформацій оброблених заготовок, виконані дослідження та визначені граничні умови отриманих залежностей (2, 15, 18, 25, 35); розроблені моделі: деформування різнотовщинної заготовки; по визначенню викривлення осі різнотовщинної заготовки, а також роздачі різнотовщинної деталі, що має жорсткі і пластичні ділянки, розроблена методика досліджень по цих моделях і здійснений аналіз отриманих результатів (5, 21, 30, 38, 43); здобувачем сформульовані і вирішені завдання досліджень по вивченню точності деформування заготовок із малими натягами (1, 14-16, 19). Автором установлені причини утворення геометричних похибок, визначені способи їх зниження, які реалізовані в конкретних науково-технологічних розробках (1, 3, 4, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 14, 20, 22, 27, 28, 31, 32, 33, 36, 37, 40, 44); автором сформульоване завдання по вдосконаленню методики оцінки міцності деформуючого інструмента, проведений аналіз результатів розрахунку (17, 24). Безпосередньо автором сформульовані основні наукові положення, розкриті в роботі, а також висновки за результатами досліджень.

Апробація роботи.

Основні положення дисертації доповідалися на: Міжнародній конференції «Сучасні проблеми механіки та фізико-хімії процесів різання, абразивної обробки і поверхневого пластичного деформування», Київ, 2002: АТМ України; «Сучасні процеси механічної обробки інструмента з НТМ та якість поверхні деталей машин» – (сер. Г «Процеси механічної обробки,

верстати та інструменти»), – Київ, 2006, Міжнародних конференціях «Интерпартнер» 2000–2005. «Високі технології: тенденції розвитку» Харків, НТУ «ХПІ» Алушта, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005; Всесоюзній конференції «Інтенсифікація виробництва й підвищення якості виробів поверхневим пластичним деформуванням», Тольятті 1989р., на Міжнародній науково-технічній конференції «Технологічний прогрес у сільськогосподарському виробництві», Глеваха, ННУ «ІМЕСХ» – 2003; 4-й Російській науково-технічній конференції «Авіакосмічні технології», Вороніж, Вороніжський державний технічний університет, АКТ–2003.

В повному обсязі дисертація доповідалась в 2016-2017 рр.: на розширеному науковому семінарі кафедри «Металорізальні верстати та системи» Центральноукраїнського національного технічного університету, на розширеному засіданні кафедр «Опору матеріалів та прикладної механіки», «Технології автоматизації машинобудування» Вінницького національного технічного університету, на розширеному науковому семінарі відділу №20 «Перспективних ресурсозберігаючих технологій механічної обробки» інституту надтвердих матеріалів НАН України ім. В.М. Бакуля, на розширеному засіданні кафедри «Технологія машинобудування» механіко-машинобудівного інституту Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» ім. І. Сікорського».

Публікації по темі дисертації.

За результатами досліджень опубліковано 44 наукові праці, у тому числі 2 монографії, 35 статей у наукових фахових виданнях (з них 3 статті виданих у виданнях іноземних держав, 8 статей у виданнях України, які входять до міжнародних наукометричних баз), 2 авторські свідоцтва СРСР, 1 патент України на корисну модель, 3 матеріали і 1 теза доповідей в збірниках конференцій.

Структура та обсяг роботи.

Повний обсяг дисертації і додатків 451 стор. Дисертаційна робота викладена на 352 сторінках і складається із вступу, 7 розділів, висновків, додатків і списку використаних джерел (232 найменування). Робота ілюстрована 20 таблицями, 214 рисунками.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність проблеми, сформульовано мету і задачі досліджень, наукову новизну і практичну цінність роботи. Наведені дані про публікації, апробацію, структуру та обсяг дисертаційної роботи.

У першому розділі розглядається сучасне представлення про схему осередку деформації при ДПР та його кінематичних, геометричних і енергетичних характеристик; стан досліджень про деформований стан оброблених заготовок, а також досліджень, що стосуються геометричної точності при ДПР.

Вивченню деформуючого протягування присвячено ряд робіт технологічного напрямку авторів: Ю.Г. Проскурякова, А.М. Ісаєва, В.М. Романова, В.П. Монченко, А.М. Кузнєцова, В.А. Кузнєцова, Р.К.

Мещерякова, Я.А. Симахина, Я.П. Кочеткова, Г.І. Шельвинського.

Також питання якості виробів, оброблених деформуючим протягуванням, вивчалось в роботах: Г.Д. Деля, Ю.А. Цеханова, В.А. Огороднікова, І.О. Сивака, О.В. Грушка, Ю.Г. Розова, де розглядався цей процес з позицій механіки пластичного деформування.

Найбільш детально цей процес розглядався в роботах школи ІНМ НАН України: А.М. Розенберга, О.А. Розенберга, Э.К. Посвятенка, С.Є. Шейкіна, Ю.Ф. Бусела, А.Д. Крицького, В.В. Кривошеї, Е.І. Гриценка, що вивчали його на основі механіки пластичного деформування.

Приведено огляд і аналіз найбільш відомих наукових публікацій. На підставі цього аналізу встановлено, що найбільш точною є схема, відповідно до якої осередок деформації складається з ділянки контакту та двох позаконтактних зон, сполучених з ним. Теоретичні моделі, що коректно описують весь осередок деформації, у розглянутих джерелах відсутні. Існуюча теоретична модель по опису деформованого стану тільки позаконтактної зони осередку деформації, дозволяє тільки на якісному рівні прогнозувати протікання процесу.

Вплив вихідної різнотовщинності на формування похибок відзначають більшість авторів. Відзначається, що різнотовщинність викликає значне зниження величини граничної пластичної деформації заготовки. Однак відсутність коректної теоретичної моделі деформованого стану не дозволяє визначити вплив вихідної різнотовщинності на похибки обробки, а також на величину граничної деформації.

Подібні недоліки мають місце при розгляді питання про такий вид похибки, як викривлення осі обробленої деталі, що виникає при обробці різнотовщинних заготовок. Оцінити її величину не представляється можливим без вивчення впливу режимів протягування, геометрії інструмента та товстостінності на осьові деформації обробленої заготовки.

Відомості, наведені в роботах, які стосуються впливу режимів роздачі та геометрії інструмента на точність, часто мають суперечливий характер. Це свідчить про складність розглянутого питання. Тому насамперед, необхідно усвідомити корінні причини утворення похибок при ДПР. Існуючі моделі, що розглядають деформований стан тільки у позаконтактних зонах осередку деформації, не дозволили виявити й систематизувати можливі причини формування похибок при ДПР. Тому причини їхнього утворення варто шукати при вивченні моделі пластичного формоутворення всього осередку деформації.

Більш того відсутність коректного аналізу причин утворення похибок при пластичній деформації заготовки не дозволяє систематизувати відомі методи управління точністю, а також розробляти нові.

З аналізу існуючих літературних джерел слідує, що проблему забезпечення геометричної точності деталей, оброблених деформуючим протягуванням, потрібно вирішувати на основі вивчення механіки їх пластичного деформування, шляхом розробки науково-обґрунтованих технологічних методів управління параметрами точності.

У другому розділі наведені умови досліджень, інструмент, апаратура,

устаткування, досліджувані матеріали, їх фізико-механічні властивості, застосовувані технологічні змащення, методи розрахункових і експериментальних досліджень деформованого стану осередку деформацій та осьових деформацій оброблених заготовок.

Експериментальні дослідження виконувалися при використанні спеціальних планів на заготовках зі сталі 10 НВ105, сталі 20 НВ125, сталі 45 НВ190, сталі 12ХН3А НВ200, сталі 55ПП НВ200, бронзи ОЦС 5-5-5, НВ72, алюмінієвого сплаву АК6 НВ62, латуні Л63 НВ65, міді М1 НВ80, чавуну СЧ20 НВ170, спеціального модифікованого чавуну НВ235 та ВЧ50.

Як матеріал робочих елементів застосовувався твердий сплав ВК15.

Для визначення осьових сил протягування використовувалися відомі методики на основі динамометрії.

Розроблена оригінальна методика, що дозволяла фіксувати осьові напруження в стінці деталі при її деформуванні.

Довжина контакту визначалася за вдосконаленою методикою, розробленої в ІНМ НАН України. Вона полягає у вимірюванні слідів, залишених на деформуючому елементі алмазовмісткими плямами, попередньо нанесеними на оброблювану поверхню.

Зміна осьових розмірів оброблених заготовок визначали методом візіопластичності по зміні відстаней між попередньо нанесеними мітками.

Кінематичні, геометричні та енергетичні параметри осередку деформацій визначалися за допомогою оригінальної розрахункової методики розробленої на основі варіаційних принципів. Розрахунок здійснювався за допомогою методу послідовних наближень. У підсумку визначали кінематичні, геометричні і енергетичні параметри осередку деформації.

Для визначення видів похибок обробленої заготовки, будували зміну профілю отвору по довжині заготовки, вимірюючи мінімальний і максимальний розмір отвору в декількох поперечних перерізах заготовки.

Шорсткість поверхні вимірялася на профілометрі-профілографі ВЭИ «Калібр» мод. 201 уздовж твірної отвору. Оцінка рельєфу й відхилень поверхонь, отворів у гільзах із чавуну, оброблених ДПР, контролювалась за допомогою профілографа-профілометра «Talysurf-5» і кругломіра «Talyscenta» (Англія).

У третьому розділі наведена розроблена математична модель осередку деформації при ДПР заготовок із невеликою товстостінністю. Для її побудови використовувався енергетичний метод, заснований на варіюванні функціонала потужності зовнішніх і внутрішніх сил деформування за допомогою параметрів кінематично можливих полів швидкостей деформацій. Схема осередку деформації та відповідні їй основні геометричні та кінематичні параметри наведені на рис. 1.

У відповідності зі схемою осередку деформації та вимогами до моделі побудоване кінематично можливе поле швидкостей. Це поле швидкостей деформацій визначалось декількома варіюваними параметрами. Для їхнього знаходження використані варіаційні принципи, що полягають у визначенні цих параметрів, які забезпечують мінімум функціоналові потужності деформування осередку деформації.

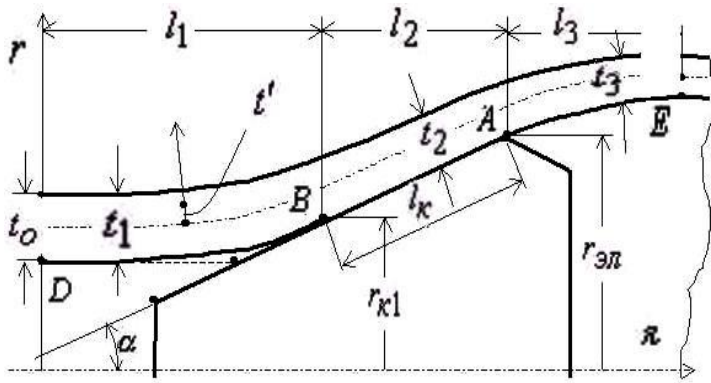


Рис. 1. Розрахункова схема осередку пластичних деформацій

Повний функціонал потужності зовнішніх і внутрішніх сил відповідно до відомих варіаційних принципів:

$$W - QV_3 \rightarrow \min, \quad (1)$$

Q – сила протягування, V_3 – швидкість течії матеріалу наприкінці осередку деформації. Величина W дорівнює сумі потужностей формоутворення кожної із трьох окремих ділянок осередку.

Відношення швидкості осрової деформації до швидкості окружної деформації позначено через K :

$$K = \frac{\xi_{z_0}}{\xi_{\varphi_0}}$$

У межах кожної ділянки ця величина має своє постійне значення K_1 , K_2 , K_3 .

Геометрію серединної поверхні $r = f(z)$ контактної ділянки описано рівнянням прямої; позаконтактних зон поліномами четвертої степені. При цьому враховуються граничні умови кожної ділянки, а також умови кінематичного сполучення на границях ділянок. Потужність пластичних деформацій контактної ділянки:

$$W_2 = 4\pi\tau_s \int_{-t_2/2}^{+t_2/2} dt'_2 \int_{l_1}^{l_2} V_z r' \sqrt{1 - K_2 + K_2^2} dz, \quad (2)$$

а потужності позаконтактних зон

$$W_{1,3} = 4\pi\tau_s \int_{-t_{1,3}/2}^{+t_{1,3}/2} dt'_{1,3} \int_0^{l_1} V_z r \sqrt{\left(\frac{r'}{r}\right)^2 - \frac{r'}{r} \left(K_{1,3} \frac{r'}{r} + r''' t'_{1,3}\right) + \left(K_{1,3} \frac{r'}{r} + r''' t'_{1,3}\right)^2} dz \quad (3)$$

Зміна швидкості осрової течії V_z і товщини стінки заготівки на кожній ділянці визначаються з умов нестискання та нерозривності деформацій.

П'ять незалежних параметрів K_1, K_2, K_3, l_1 , і l_3 – є варійованими параметрами, які повинні забезпечити функціоналу (1) мінімум. Основні вирази для кожної ділянки мають наступний вигляд. Ділянка позаконтактної деформації ДВ:

$$r = r_{cp} + \frac{3}{4} \frac{tg\alpha}{l_1} z^2 - \frac{tg\alpha}{8l_1^3} z^4; \quad t_1 = t_0 \left[e^{\int_0^{l_1} \frac{r'}{r} dz} \right]^{K_1-1}, \quad V_z = V_{zo} e^{-K_1 \int_0^{l_1} \frac{r'}{r} dz}$$

Контактна ділянка ВА:

$$r_k = r_{cp} + \frac{5}{8} tg\alpha l_1 \quad (4)$$

$$V_{z_2} = V_o \left[e^{\int_0^{l_1} \frac{r'}{r} dz} \right]^{-K_1} \left[e^{\int_{l_1}^{l_1+l_2} \frac{r'}{r} dz} \right]^{-K_2};$$

$$t_{K_2} = t_o \left[e^{\int_0^{l_1} \frac{r'}{r} dz} \right]^{K_1-1} \left[e^{\int_{l_1}^{l_1+l_2} \frac{r'}{r} dz} \right]^{K_2-1}.$$

Позаконтактна ділянка АЕ:

$$r = r_{cp3} + tg\alpha - \frac{tg\alpha}{2l_3^2} z_3^3 + \frac{tg\alpha}{8l_3^3} z_3^4;$$

$$V_{z_3} = V_o \left[e^{\int_0^{l_1} \frac{r'}{r} dz} \right]^{-K_1} \left[e^{\int_{l_1}^{l_1+l_2} \frac{r'}{r} dz} \right]^{-K_2} \left[e^{\int_{l_1+l_2}^{l_1+l_2+l_3} \frac{r'}{r} dz} \right]^{-K_3};$$

$$t_3 = t_o \left[e^{\int_0^{l_1} \frac{r'}{r} dz} \right]^{(K_1-1)} \left[e^{\int_{l_1}^{l_1+l_2} \frac{r'}{r} dz} \right]^{(K_2-1)} \left[e^{\int_{l_1+l_2}^{l_1+l_2+l_3} \frac{r'}{r} dz} \right]^{(K_3-1)}$$

Розрахунок по розробленій моделі здійснювався за допомогою методу послідовних наближень. За результатами останньої ітерації визначали: l_1 , l_3 , K_1, K_2, K_3, l_2 і l_k , W_1, W_2, W_3, W_{mp} , W .

У результаті чисельного моделювання на РС отримані наступні найбільш важливі результати.

Визначено залежність довжини позаконтактних зон l_1 і l_3 від товстостінності заготовки $\bar{t}_0 = t_0/r_0$. Збіг розрахункових і експериментальних

даних спостерігається не тільки для тонкостінних заготовок, але і при більш значних товщинах стінки до $t_0 = 0,5$.

Отримано залежність довжини контакту l_k від товстостінності. Збіг розрахункових і експериментальних даних (рис. 2) спостерігається до критичної товщини стінки $t_{кр}$, при якій згідно з даними О. А. Розенберга контактний тиск досягає критичної величини – $q_{кр}$, яку ним запропоновано розглядати, як фізичну константу оброблюваного матеріалу.

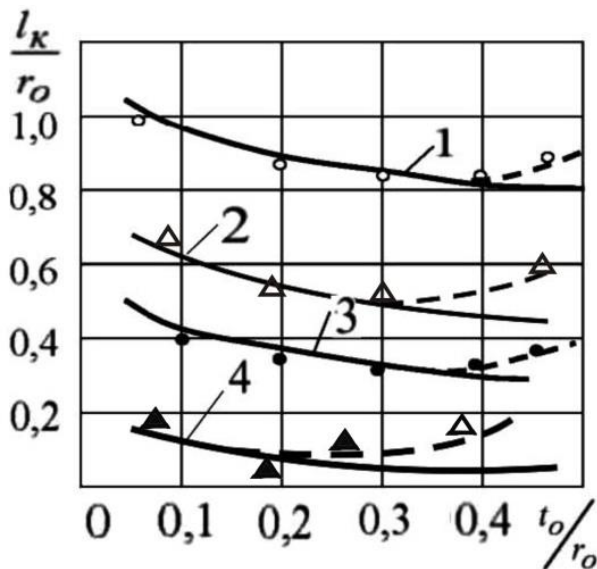


Рис.2. Залежність довжини контакту від товщини стінки заготовки із сталі 20, HB125: Розрахунок 1 - $\alpha=2^\circ$, $a/d_0 = 0,0375$; 2 - $\alpha=2^\circ$, $a/d_0 = 0,025$; 3 - $\alpha=4^\circ$, $a/d_0=0,0375$; 4 - $\alpha=4^\circ$, $a/d_0 = 0,025$. Експеримент - $\circ \bullet \triangle \blacktriangle$

У цьому випадку спостерігається поява локальної зони пластичного деформування, яка приводить до утворення додаткового «напливу» у зоні контакту, що, природно, збільшує довжину контакту.

Це питання розглядалося більш поглиблено. Висота $h_{бз}$ позаконтактної зони (рис. 3, а), яка визначає довжину контакту, виходячи з виразу (4), залежить від товстостінності заготовки та кута α . Як слідує з рис. 3, а.

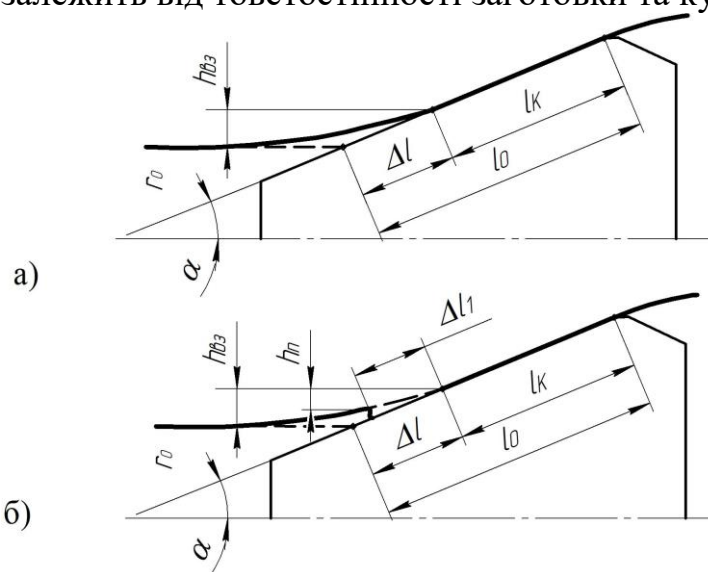


Рис. 3. Варіанти схеми осередку деформації при ДПР.

$$l_k = l_0 - \Delta l = \frac{a}{2 \sin \alpha} - \frac{h_{б.з}}{\sin \alpha} \quad (5)$$

З огляду на наші експериментальні дані та вираз 4, де $l_l = 0,611 \cdot t_0^{0,54} r_0^{0,46}$

залежність (5) представимо у вигляді:

$$l_k = \frac{a}{2 \cdot \sin \alpha} - \frac{3,06 \cdot t_0^{0,54} \cdot r_0^{0,46}}{8 \cdot \cos \alpha},$$

При $\frac{a}{2} \rightarrow h_{\text{в.з}}$ довжина контакту буде наближатись до нуля. У дійсності зменшення l_k веде до збільшення контактного тиску, що не може для конкретного матеріалу перевищити граничне значення. Отже, фізично при досягненні l_k деякої малої величини її зменшення припиняється за рахунок виникнення в контактній зоні помітної локальної пластичної деформації. У цьому випадку схема осередку деформації буде відповідати рис. 3,б. Тому розрахунок l_k необхідно робити по залежності:

$$l_k = \frac{a}{2 \cdot \sin \alpha} - \frac{3,06 \cdot t_0^{0,54} \cdot r_0^{0,46}}{8 \cdot \cos \alpha} + \frac{h_{\text{л}}}{\sin \alpha}, \quad (6)$$

де $h_{\text{л}}$ – висота напливу.

У тому випадку, коли роздача заготовки відбувається при наявності в зоні контакту критичного контактного тиску (рис. 3,б.), помітно істотний вплив оброблюваного матеріалу на довжину контакту.

Отже, розрахунок довжини контакту залежно від умов ДПР необхідно робити по двох моделях осередку деформації (рис. 3), що також дозволяє врахувати вплив оброблюваного матеріалу на цей параметр.

Встановлено, що потужність пластичних деформацій у контактній зоні W_2 має чітко виражений мінімум при $K_2 = 0,5$ (рис. 4), і течія матеріалу в цій зоні жорстко визначена формою інструмента, тому процес деформування в цій зоні має стійкий характер.

А от потужності у позаконтактних зонах такого явно вираженого мінімуму не мають. Їх мінімальне значення досягається в широкому діапазоні зміни параметра $K=0,4-2,3$. Тому у позаконтактних зонах, де до всього оброблюваний матеріал не контактує з інструментом, процес деформування має явно виражений нестійкий характер, оскільки кінематичні параметри в цих зонах мають більше число степенів свободи.

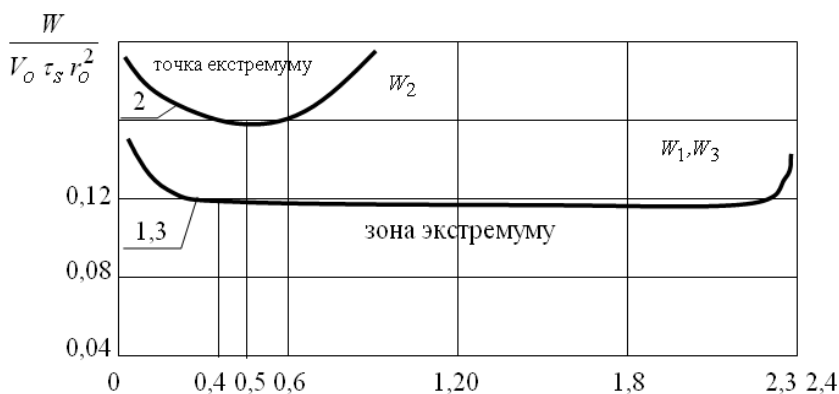


Рис. 4. Залежності потужності пластичної формозміни в контактній зоні (2) і у позаконтактних зонах (1, 3) від параметра осьової деформації K при $\alpha = 2^\circ$, $\frac{t_0}{r_0} = 0,4$

При цьому навіть невеликі зовнішні збурювання процесу (вихідна похибка заготовки та похибка її базування, неоднорідність властивостей її матеріалу, вплив ваги інструмента та ін.) підсилюють явище нестійкості течії

у позаконтактних зонах, що на практиці приводить до утворення значних похибок обробки.

Розроблена модель дозволила проаналізувати енергетику процесу ДПР. Розрахунки виконувалися для безрозмірних потужностей:

$$\bar{W} = \frac{W}{\tau_s V_0 r_0^2};$$

Установлено, що загальна потужність W зі збільшенням кута α і натягу зростає. Інтенсивність її зростання збільшується з ростом товстостінності заготовки.

Потужність деформування у позаконтактних зонах - \bar{W}_{ϵ_3} також росте зі збільшенням α і товстостінності заготовки. Апроксимацією розрахункових даних отримана проста інженерна залежність для визначення \bar{W}_{ϵ_3} :

$$\bar{W}_{\epsilon_3} = \left[0,24 \left(\frac{t_0}{r_0} \right)^2 + 0,034 \frac{t_0}{r_0} \right] \alpha. \quad (7)$$

Характер зміни \bar{W}_{mp} від α однаковий для всіх товщин стінки. Найбільше значення \bar{W}_{mp} спостерігається в області малих кутів $0 < \alpha \leq 2^\circ$, що пояснюється більшими значеннями довжини контакту. Аналіз зміни складових потужності від кута α (рис. 5) показав, що частка роботи тертя не залежить від розмірів заготовки та режимів роздачі, а визначається тільки коефіцієнтом тертя та кутом α .

Тобто

$$\frac{\bar{W}_{mp}}{\bar{W}} = \frac{f}{\cos \alpha (f \cos \alpha + \sin \alpha)} \quad (8)$$

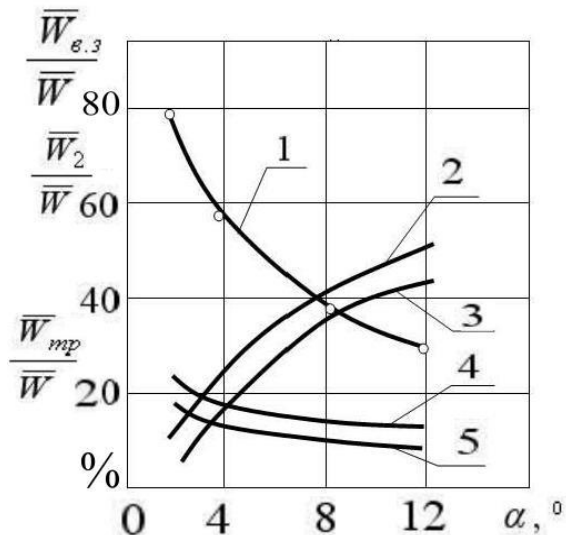


Рис. 5. Залежність зміни частки потужності від кута α при $a/d_0 = 0,0375$ 1 - \bar{W}_{ϵ_3} ; \bar{W}_2 2 - при $t_0/r_0 = 0,2$; 3 - при $t_0/r_0 = 0,1$; \bar{W}_2 4 - при $t_0/r_0 = 0,1$; 5 - при $t_0/r_0 = 0,2$
Точками нанесені дані аналітичного розрахунку

При малих α і високих значеннях f потужність сил тертя може досягати до 80% від загальної потужності. У той же час при більших α і низьких значеннях f співвідношення $\frac{\bar{W}_{mp}}{\bar{W}}$ знижується до 25%.

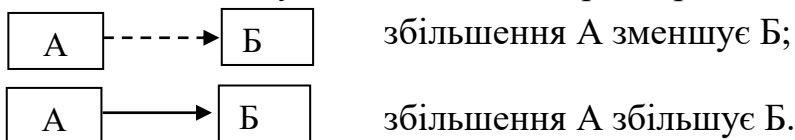
На підставі цього визначені шляхи технологічного управління

енергетикою процесу, через зміну технологічних факторів, що впливають на її складові.

Представимо це у вигляді схеми (рис. 6). Вона дозволяє залежно від наявного обладнання, розмірів і вимог до деталей використовувати розроблені рекомендації для зниження енерговитрат на величину до 50%.



Рис. 6. Схема впливу технологічних параметрів на енергетику процесу.



У четвертому розділі розглянуті результати по дослідженню деформацій оброблених заготовок.

Розроблену модель осередку деформації можна використовувати для визначення деформацій заготовок, товстостінність яких менше критичної товщини стінки. Для більше товстостінних заготовок її використовувати недоцільно.

Тому для можливості порівняльного аналізу результатів досліджень у всьому діапазоні зміни товстостінності були обрані експериментальні методи вивчення деформацій оброблених заготовок, з наступним аналізом результатів на феноменологічному рівні.

На рис. 7 показано, що властиве тонкостінним деталям укорочення з ростом товстостінності переходить у подовження. Установлено, що залежно від геометрії інструмента, режимів протягування та товщини стінки, осьові деформації заготовки можуть бути трьох видів: осьове укорочення, відсутність осьових деформацій, осьове подовження.

Для випадку укорочення отримані залежності для розрахунку деформацій заготовок, оброблених по схемах стиснення та розтягнення.

Для схеми розтягнення:

$$\varepsilon_\varphi = \frac{\sum a}{d_0}; \quad \varepsilon_r = -0,75 \frac{\sum a}{d_0}; \quad \varepsilon_z = -0,25 \frac{\sum a}{d_0}; \quad (9)$$

для схеми стиснення:

$$\varepsilon_\varphi = \frac{\sum a}{d_0}; \quad \varepsilon_r = -(0,54 + 1,9 t_0/d_0) \frac{\sum a}{d_0}; \quad \varepsilon_z = (0,46 - 1,9 t_0/d_0) \frac{\sum a}{d_0}. \quad (10)$$

$\frac{\sum \Delta L}{L_0}$

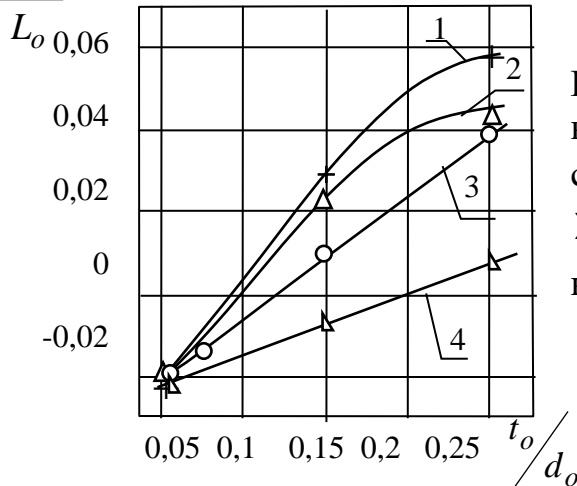


Рис. 7. Залежність сумарної зміни довжини втулок із сталі 20 від відносної товщини стінки з $d_0 = 40$ мм; $a/d_0 = 0,125$; $\Sigma a/d_0 = 0,075$; кут α : 12° (1), 8° (2), 4° (3), 2° (4).

Формули (9) і (10) з достатньою точністю, виражають сумарні

деформації заготовок, оброблених по схемах стиснення та розтягнення, описують їх кінцевий деформований стан. Максимальна товстостінність заготовки \bar{t}_0 , до якої справедливі ці залежності, залежить від кута α , натягу \bar{a} і визначається з виразів:

для схеми розтягнення

$$\bar{t}_{0p} = 3,387 \left(\frac{a}{d_0} \right)^{0,75} \alpha^{-(0,17+14,3 \frac{a}{d_0})}, \quad (11)$$

для схеми стиснення

$$\bar{t}_{0сж} = (0,11 + 10,24 \frac{a}{d_0}) \alpha^{-(0,17+11,6 \frac{a}{d_0})}. \quad (12)$$

Появі подовження заготовки передуює випадок роздачі її без зміни довжини, коли $\varepsilon_z = 0$. Відповідно до експериментів товщина стінки, при якій $\varepsilon_z = 0$, відповідає $\bar{t}_{кр}$ (критичній товщині стінки, при якій, як вказувалося вище, контактний тиск досягає критичної величини $q_{кр}$). У свою чергу $\bar{t}_{кр}$ викликає зміну схеми осередку деформації (рис. 3,б) і відповідає появі мінімуму залежності $l_2 = f(\bar{t}_0)$ (рис. 2).

Таким чином, встановлена важлива закономірність: досягнення в зоні контакту критичного контактного тиску якісно міняє схему формоутворення – переходом укорочення до подовження.

Отримано залежності для вибору необхідного кута α , що забезпечує

деформування заготовки без зміни її довжини при заданих натягах і товстостінності.

$$\text{Для схеми розтягнення: } \alpha_p = \frac{(0,5 + 6,9\bar{a})}{t_0} \quad (13)$$

$$\text{Для схеми стиснення: } \alpha_{сжс} = \frac{(0,35 + 34,8\bar{a})}{t_0} \quad (14)$$

При подальшому збільшенні контактного тиску виникає подовження заготовки.

Виявлено факт аномальної зміни довжини для випадку деформування заготовок із різних матеріалів з товщиною стінки $t_0 > t_{кр}$ деформуючим елементом з кутом $\alpha > 6^\circ$ (рис. 8 крива 1). Для пояснення цього факту розглянута зміна сили протягування, довжини контакту, контактної тиску.

Установлено, що для кутів $\alpha > 6^\circ$ змінюється характер залежності $q = f(\bar{a})$, тобто збільшення натягу приводить до росту контактної тиску.

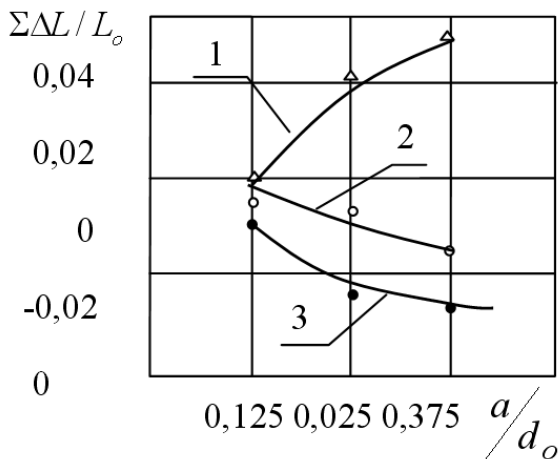


Рис. 8. Залежність зміни довжини деталі від відносного натягу на елемент; втулки із сталі 45, $t_0/d_0 = 0,25$, $d_0 = 40$ мм, сумарна деформація $\Sigma a/d_0 = 0,075$, α_u : 12° (1), 4° (2), 2° (3)

Вплив матеріалу на довжину контакту та осьову деформацію спостерігається тільки при деформуванні заготовок із товщиною стінки більше критичної, тобто при наявності в зоні контакту критичного контактної тиску.

Методом регресійного аналізу, для випадку роздачі деталей з товщиною стінки $t_0 \geq t_{кр}$, отримані інтерполяційні моделі для визначення осьових деформацій з достатньою для інженерної практики точністю.

У п'ятому розділі розглянуто деформування різнотовщинних деталей.

Для аналізу впливу вихідної різнотовщинності на деформований стан обробленої заготовки розроблена теоретична модель деформування різнотовщинної труби.

Особливістю деформування різнотовщинної в окружному напрямку труби (рис. 9) є те, що при малому ступені роздачі $\varepsilon = a/d_0$ пластичні деформації з'являються в найбільш тонкому місці, а потім у міру росту ε кут охопту пластичної області φ_0 збільшується за рахунок ефекту деформаційного зміцнення.

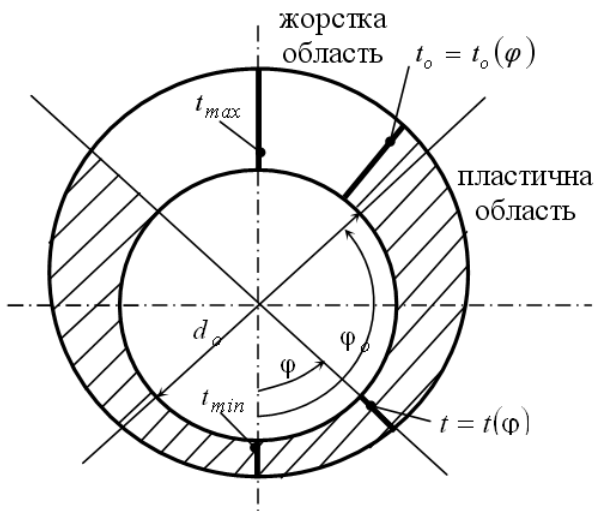


Рис. 9. Схема деформування різнотовщинної труби

При певній комбінації степені різностінності, деформації при роздачі ε і здатності оброблюваного матеріалу до зміцнення пластична область може охопити весь об'єм заготовки ($\varphi_0 = \pi$). При їх несприятливому сполученні товстостінна частина заготовки залишається недеформованою, що приводить до появи бракувальної ознаки. Нерівномірність розподілу деформації в окружному напрямку (їх максимум перебуває при $\varphi = 0$, де $t_0 = t_{min}$) може привести до браку за рахунок руйнування або локальної втрати стійкості течії матеріалу, тобто утворення шийки.

За допомогою рівняння кривої течії $\sigma_0 = \sigma_T + Be_0^n$ для різнотовщинної труби отримане співвідношення (15) між степенем роздачі ε та кутовим розміром пластичної області φ_0 .

У результаті чисельних розрахунків для різних матеріалів і різнотовщинностей отримані залежності ε від φ_0 .

$$\varepsilon = \frac{1}{\pi} \frac{\sqrt{3}}{2} \left(\frac{\sigma_T}{B} \right)^{\frac{1}{n}} \int_0^{\varphi_0} \left[\frac{t_0(\varphi_0)}{t_0(\varphi)} - 1 \right]^{\frac{1}{n}} d\varphi \quad (15)$$

На рис. 10 наведена залежність ε від ступеня різнотовщинності Δ для випадку, коли заготовка повністю переходить у пластичний стан ($\varphi = \varphi_0$). Зірочкою відзначена крапка відповідному початку втрати стійкості, тобто утворення шийки, у самому тонкому місці.

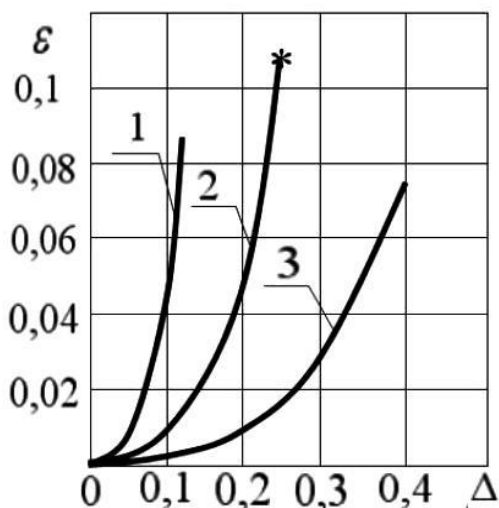


Рис.10. Залежність сумарної деформації, при якій пластична зона охоплює весь об'єм заготовок від ступеня різнотовщинності Δ :

1. $\sigma_T = 350 \text{ МПа}$ $B = 1579 \text{ МПа}$ $n = 0,48$

2. $\sigma_T = 350 \text{ МПа}$ $B = 789 \text{ МПа}$ $n = 0,48$

3. $\sigma_T = 35 \text{ МПа}$ $B = 395 \text{ МПа}$ $n = 0,48$

* - втрата стійкості деформування для матеріалу сталь 45

Розроблено алгоритм використання отриманих результатів при визначенні мінімально необхідної деформації що забезпечує деформування всього об'єму різнотовщинної заготовки.

Як показано в розділі 4 зміна осевих розмірів заготовки при ДПР залежить від \bar{t}_0 , а також від режимних факторів і геометрії інструмента. Тому при деформуванні різнотовщинних заготовок кожна з поздовжніх ділянок змінює свою довжину по різному. Це приводить до утворення такого виду похибки, як викривлення осі деталі (рис. 11)

Для її оцінки розроблена розрахунково-експериментальна модель по визначенню прогину осі f залежно від зміни довжини тонкостінної та товстостінної ділянок.

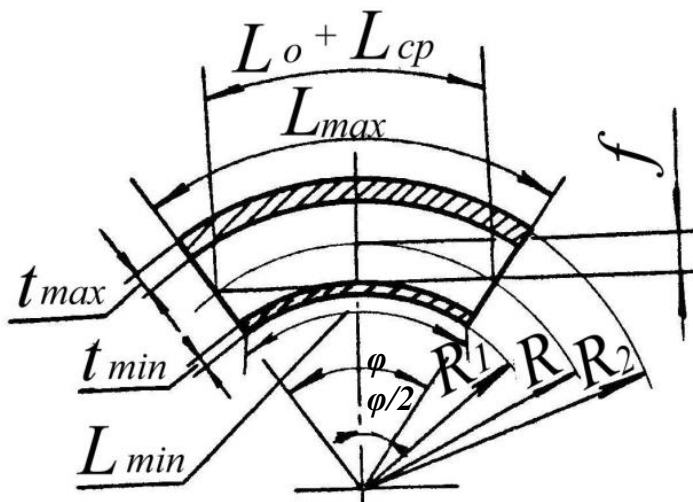


Рис. 11. Викривлення осі різнотовщинної деталі.

$$f = \frac{[L_o + 0,5(\Delta l_{\max} + \Delta l_{\min})]D}{\Delta l_{\max} - \Delta l_{\min}} \cdot \left[1 - \cos \frac{(\Delta l_{\max} + \Delta l_{\min})}{2D} \right] \quad (16)$$

Вхідні в залежність (16) значення Δl_{\max} та Δl_{\min} – максимальна і мінімальна зміна довжини різнотовщинних ділянок, визначені експериментально в розділі 4. Виконані розрахунки показали, що ДПР за схемою розтягнення можна успішно застосовувати для обробки тонкостінних заготовок із товщиною стінки, яка обмежується значенням t_{op} , яке визначається виразом (11). У цьому випадку практично відсутній вплив різностінності, натягу і кута α на викривлення осі. Зі збільшенням товщини стінки менше викривлення осі мають деталі, оброблені деформуючими елементами з $\alpha=1-2^\circ$ і натягами $a/d_0 \geq 0,0375$. При подальшому збільшенні товщини стінки $t > 0,2$ мінімальне викривлення осі забезпечується обробкою елементами з кутами $2^\circ < \alpha < 8^\circ$ при використанні відносно значних натягів.

При роздачі деталей складної форми, що мають виступи, бонки або значні перепади товщини стінки в поперечному перерізі рис. 12, можуть виникнути досить істотні похибки, що приводять до появи браку.

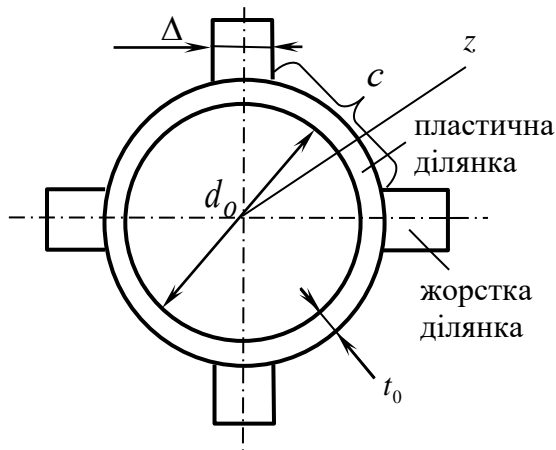


Рис. 12. Заготовка із жорсткими та пластичними ділянками.

Для успішної обробки таких деталей запропонований спосіб гарантованої локалізації пластичної деформації за рахунок створення в заготовках недеформованих (жорстких) ділянок, а також розроблена теоретична модель роздачі труби, що має жорсткі та пластичні ділянки.

З урахуванням зміцнення матеріалу і утонення стінки пластичної ділянки в процесі роздачі визначене припустиме співвідношення товщин стінок пластичної $t_{пл}$ і жорсткої $t_{ж}$ ділянок, що забезпечує гарантовану локалізацію деформації на пластичних ділянках:

$$\left[\frac{t_n}{t_{жс}} \right] = \frac{\sigma_T e^{\frac{\varepsilon}{1-\beta}}}{K_{nl} \left[\sigma_T + A \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^n \left(\frac{\varepsilon}{1-\beta} \right)^n \right]}, \quad (17)$$

де $K_{nl} > 1$; $\beta = 4\Delta/\pi d_0$.

Отримано залежність, що дозволяє врахувати зміну граничної деформації при наявності жорстких ділянок.

$$\frac{e_\varphi}{e_{\varphi_0}} = \frac{1}{1-\beta} \quad (18)$$

Шостий розділ присвячений визначенню шляхів забезпечення геометричної точності при ДПР. На підставі аналізу результатів математичного моделювання визначено, що позаконтактні зони є місцем інтенсивного утворення похибок деталі.

Експериментальні дані по впливу режимів протягування і геометрії інструмента на утворення максимальної похибки отворів (рис. 13) підтвердили цей факт.

Аналіз деформованого стану оброблених заготовок, а також вивчення впливу різновтовщинності на викривлення осі обробленої заготовки, показали, що цей вид похибки виникає в зоні контакту і обумовлений варіацією осьових розмірів різновтовщинних ділянок заготовки (рис. 11).

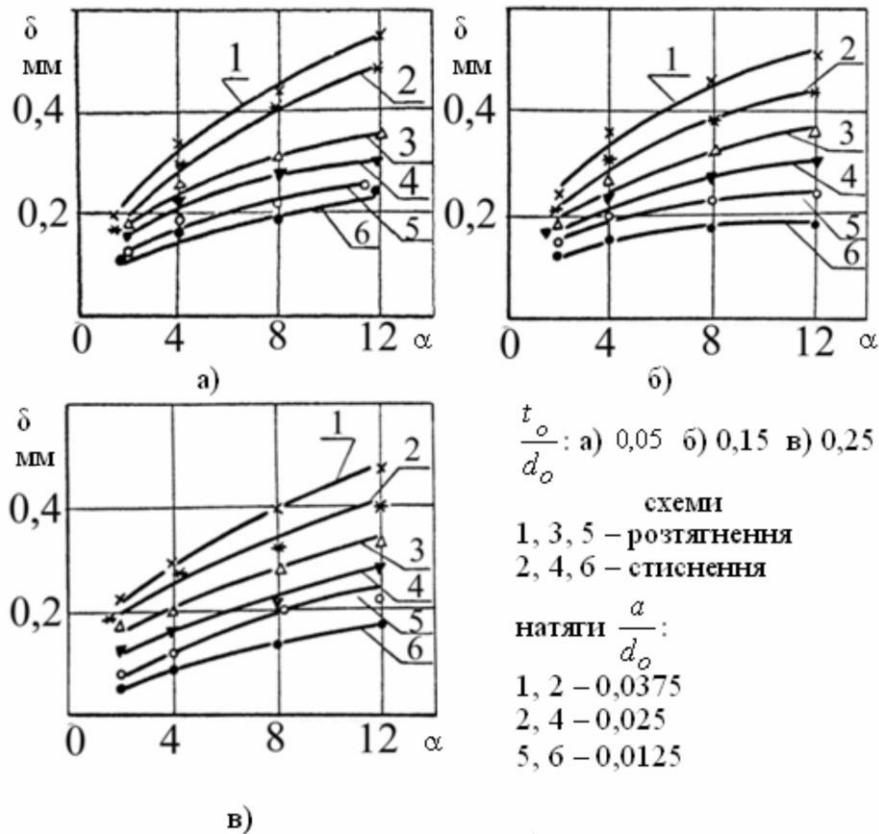


Рис. 13. Залежність максимальної похибки обробленої заготовки від кута α

Експериментальні дані, що стосуються варіації осьових деформацій по поперечному перерізі різнотовщинної заготовки (рис. 14,а) свідчать про вплив кута α і натягу на елемент, на неї. У свою чергу варіація значень осьових деформацій $\Delta l_{max}-\Delta l_{min}$, які входять до виразу (16), визначає викривлення осі f . Цей вид похибки залежить від вихідної різнотовщинності, а також від технологічних факторів α , \bar{a} , $\sum \bar{a}$.

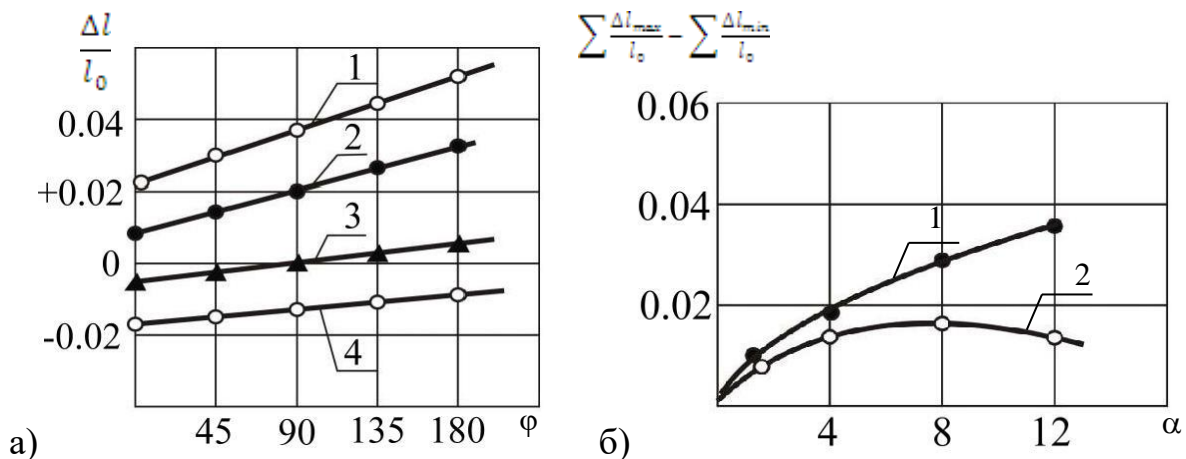


Рис. 14. Залежність варіацій значень осьових деформацій у поперечному перерізі при натягу $a/d_o = 0,025$ від кута α : а) $t_{min}=0,1$; $\varphi=0$; $t_{max}=0,15$; $\varphi=180^\circ$; α – 1– 12° ; 2– 8° ; 3– 4° ; 4– 2° ; б) 1 – $t_{min}=0,1, t_{max}=0,15$; 2 – $t_{min}=0,15$; $t_{max}=0,24$;

З аналізу розрахунків згідно виразу (16) встановлено, що мінімальний вигин забезпечується при значеннях кута α : $2^\circ \leq \alpha \leq 8^\circ$. Максимальний вигин

спостерігається при використанні кута $\alpha=4-6^\circ$, а також при використанні мінімальних натягів. Експерименти підтвердили, що на цей факт варто звернути увагу, тому що він спростовує загальноприйняті рекомендації по використанню деформуючих елементів з кутом $\alpha=4^\circ$, як оптимального.

Таким чином, розроблена модель для оцінки такого виду похибки, як викривлення осі різнотовщинної заготовки, дозволила визначити кількісне значення цього виду погрішності в широкому діапазоні зміни технологічних факторів, геометрії інструмента, вихідної різнотовщинності та підтвердити висновок, отриманий на основі теоретичних даних, що цей вид похибки утворюється в контактній зоні осередку деформації.

На підставі моделювання розроблені рекомендації з вибору оптимальних режимів протягування та геометрії інструмента, що дозволяють зменшити цей вид похибки в 1,5-2 рази.

Також розглянутий вплив вихідних похибок на геометричні похибки оброблених деталей. Аналіз цих результатів показав, що при деформуванні із пластичними деформаціями, що охоплюють весь об'єм заготовки (наскрізна деформація), похибка обробленого отвору практично не залежить від вихідної. У цьому випадку вихідні похибки отвору трансформуються на зовнішню поверхню заготовки, де легко видаляються наступною механічною обробкою.

Однак є цілий ряд деталей, які не можна деформувати з великими натягами та наскрізними деформаціями. До них відносяться заготовки з нескінченною товщиною стінки, а також вироби з напівкрихких матеріалів. Слід зазначити, що в цьому випадку ДПР застосовується, як фінішна операція обробки, забезпечуючи необхідний розмір отвору, потрібну шорсткість і зміцнення. Вихідна похибка отвору повинна бути незначною і не перевищувати сумарну пластичну деформацію отвору, яка обмежується відсутністю пластичної деформації біля зовнішньої поверхні заготовки.

Тому обробка заготовок із чавуну виконується з малими натягами і невеликими сумарними деформаціями. У цьому випадку має місце стабільна усадка отвору, яка може перевищувати номінальний натяг. Це створює реальні умови для здійснення додаткової пластичної деформації отвору при відсутності її на зовнішній поверхні.

Показано, що таку додаткову пластичну деформацію необхідно здійснювати використовуючи зворотний хід інструмента через уже оброблений отвір. При цьому кут твірної зворотного конуса деформуючого елемента α_1 , повинен перевищувати кут α і визначатися відповідно до залежності:

$$\alpha_1 = (3,24 - 3,96) \cdot \alpha^{0,96}$$

У цьому випадку має місце пластична деформація поверхневого шару. У той же час зовнішня поверхня заготовки деформується пружно, що виключає її руйнування.

Експерименти по деформування заготовок із малими натягами показали, що вихідна похибка отвору впливає на точність обробки. Крім неї, вплив має геометрія інструменту, натяг і кількість циклів деформування, причому, ріст кожного з перерахованих факторів збільшує похибки обробки.

Таким чином, вивчення особливостей формування похибок при обробці з малими натягами показало, що визначальним режимним параметром з позиції їх мінімізації є величина сумарної пластичної деформації отвору, що обмежується необхідною точністю форми отвору, а при обробці напівкрихких матеріалів необхідною точністю форми отвору і ресурсом пластичності оброблюваного матеріалу.

Особливо варто зупинитися на похибках зовнішньої поверхні деталі, які визначають припуск під її послідовуючу обробку. Вони утворюються на ділянках, що прилягають до торців деталі, у результаті нестационарності деформування на вході та виході деформуючого елемента. Тому усунення похибок зовнішньої поверхні представляє самостійну проблему.

Аналіз вищенаведеного матеріалу свідчить, що похибки деталей, оброблених деформуючим протягуванням, утворюються, як у контактній, так і у позаконтактних зонах осередку деформації та обумовлені нестійкістю течії матеріалу у осередку деформації, варіацією осьових деформацій ділянок різнотовщинних в окружному напрямку заготовок, а також впливом зовнішніх факторів: вихідної похибки заготовки та похибками її базування, які спотворюють осесиметричність її деформування. Представимо вплив технологічних факторів, геометрії інструмента, вихідної похибки заготовки, похибок її базування, параметрів осередку деформації на геометричну точність виробів у вигляді схеми (рис. 15).

Ці дані дозволяють визначити основні шляхи зниження похибок при деформуючому протягуванні. Ними являються:

- вплив на деформування у позаконтактних зонах;
- вплив на деформування на ділянці контакту;
- усунення впливу зовнішніх факторів, що спотворюють осесиметричність течії матеріалу, тобто вихідної похибки заготовки та похибок її базування;
- усунення похибок зовнішньої поверхні.

Як відзначалося раніше, деформування в різних зонах осередку деформації представляє єдиний процес пластичного формоутворення заготовки. Тому його збурення у формі прояву нестійкості течії в кожній із зон неминуче відіб'ється на формуванні геометричних похибок деталі.

Отже, запобігання нестійкості у формі геометричних збурень течії матеріалу необхідно здійснювати у всіх зонах і насамперед у позаконтактних, де, як показано в розділі 3, має місце нестійкість течії матеріалу навіть при відсутності зовнішніх збурюючих факторів.

Як слідує з відомих законів механіки та теорії стійкості, сам початок прояву або зникнення нестійкості руху в механічних системах дуже сильно залежить від найменших проявів збурюючих або стабілізуючих факторів.

Стосовно до нашого процесу слідує, що активне технологічне втручання, навіть незначне по величині, на зони осередку деформації, особливо на позаконтактні, може істотно вплинути на стабільність усього процесу деформування і, природно, на зниження похибок обробки.

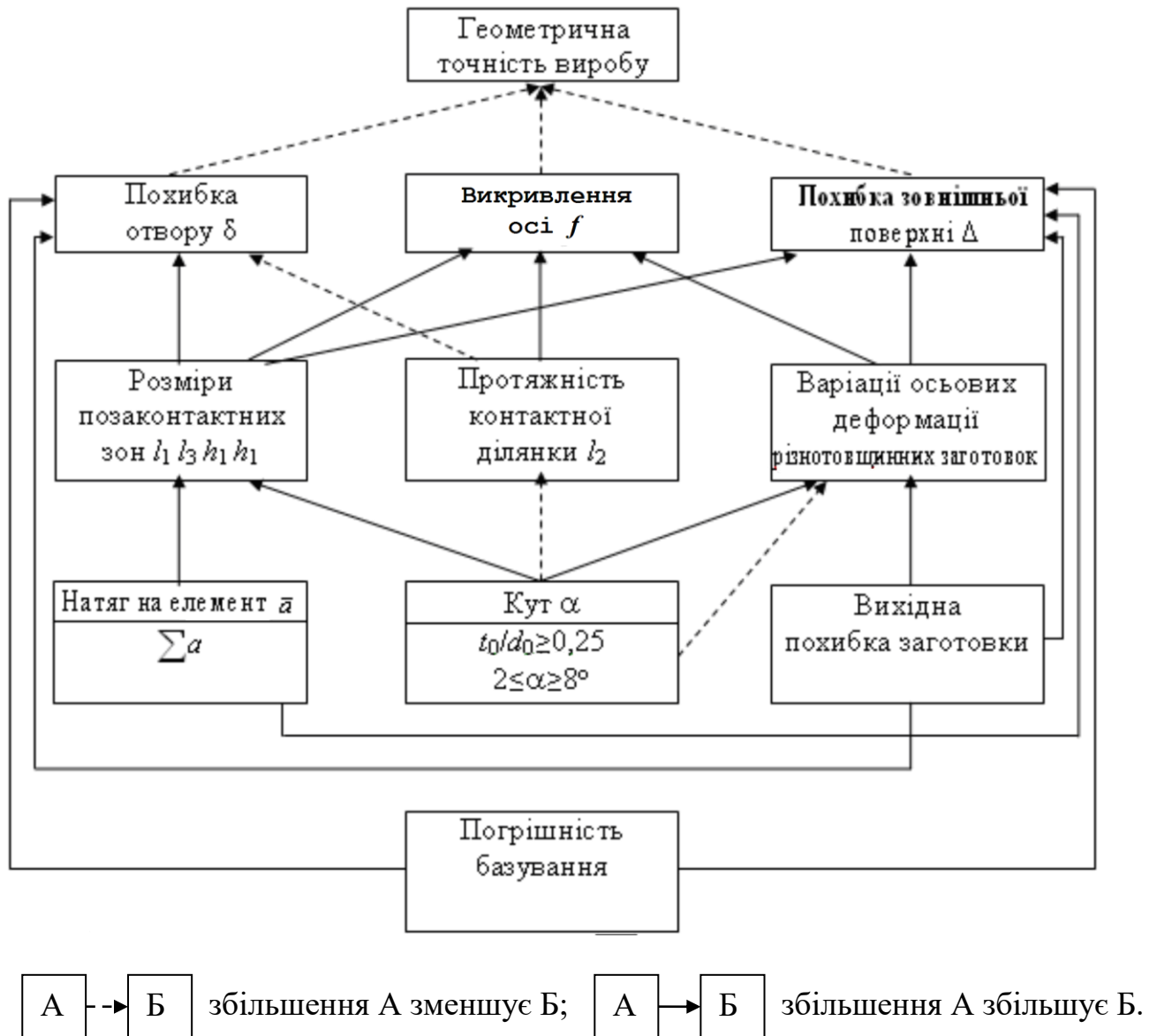


Рис. 15. Вплив технологічних факторів погрішностей базування, вихідної погрішності заготовки на геометричну точність виробу.

Впливати на течію матеріалу у позаконтактних зонах можна різноманітними конструкторсько-технологічними прийомами, в основу розробки яких покладені результати вищенаведених досліджень. Наприклад, вибором раціональних режимів роздачі та геометрії інструмента, що дозволяють зменшувати розміри позаконтактних зон.

Впливати на течію матеріалу у позаконтактних зонах також можна за рахунок накладення додаткових стабілізуючих зв'язків, що наближають деформування матеріалу у позаконтактних зонах до умов деформування в зоні контакту. Це реалізується за рахунок сполучення зон позаконтактної деформації сусідніх деформуючих елементів у групі одночасно здійснюючих деформацію заготовки. Як показали експерименти, зниження максимальної похибки деталі при цьому досягло до 50%.

Впливати на умови деформування у позаконтактній зоні за ділянкою контакту дозволяє нова конструкція деформуючого елемента. У цього елемента (рис. 16) робочий конус 1 сполучений із криволінійною ділянкою 2.

Параметри її твірної розраховані, виходячи з результатів математичного моделювання та повністю повторюють позаконтактну зону. Використання такого інструмента знижує похибки обробленого отвору до 80%.

Схема протягування по-своєму впливає на точність обробки. Підвищення точності при переході від схеми стиснення до схеми розтягнення обумовлено появою в стінці деталі осьових розтягуючих напружень, які підвищують поздовжню стійкість заготовки і стабілізують процес її деформування. Схема з обмеженням осьової деформації є вдосконаленою схемою протягування на розтягнення і, як показали експерименти, дозволяє управляти рівнем осьових напруг у процесі обробки. Слід зазначити, що однією з основних причин виникнення похибок при деформуванні заготовок із перепадом товщини стінки в осьовому напрямку є зміна рівня осьових напруг і пов'язаних з ними осьових деформацій. Тому, ця схема незамінна при протягуванні довгих тонкостінних деталей. Вона стабілізує процес їх деформування, що у свою чергу дозволяє уникнути появи досить істотних похибок обробки.

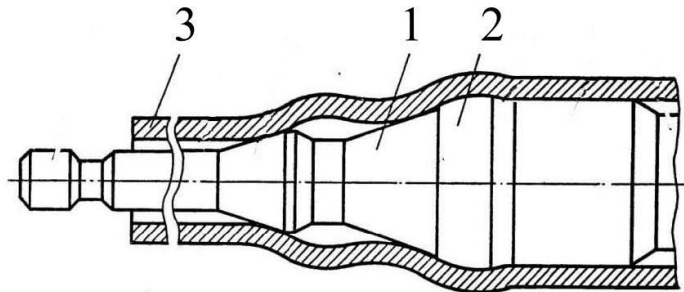


Рис. 16. Нова конструкція деформуючого елемента, що підвищує точність обробки

Другим важливим напрямком підвищення точності деталей при ДПР є вплив на течію металу на ділянці контакту. Це можна здійснити за рахунок вибору раціональних режимів протягування і геометрії інструмента, що дозволяють знизити варіацію зміни осьових розмірів заготовки (рис. 14). Особливо, це істотно впливає на зниження такого виду похибки, як вигин осі, яка має місце при обробці різнотовщинних деталей.

За результатами експериментального дослідження деформованого стану оброблених заготовок слідує, що схема протягування також впливає на осьові деформації. Отже, вибір необхідної схеми роздачі є одним з варіантів, що можуть впливати на течію матеріалу в контактній зоні.

Зниження різнотовщинності заготовки і усунення впливу змінної жорсткості деталей (тобто наявності буртів, канавок) також знижує похибки, що виникають у контактній зоні.

Для цього нами розроблений новий спосіб (рис. 17), відповідно до якого ділянку заготовки 1, використовувану для базування необхідно попередньо роздавати деформуючим елементом 2 на потрібну величину $e_1 = (0,85 - 0,9) \cdot e_2$, де e_2 – необхідна деформація отвору.

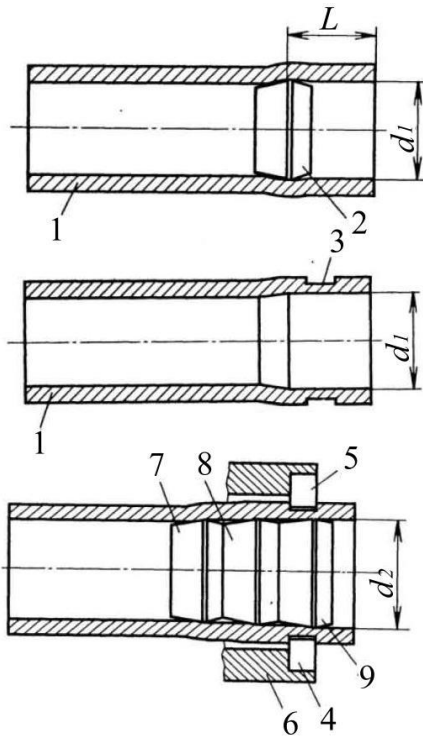


Рис. 17. Попередня підготовка бази при протягуванні по схемі розтягнення

Після здійснення попередньої деформації на ній підготовляють базу 3 для закріплення заготовки розрізними напівкільцями 4 і 5 в опори 6 при її остаточній обробці. У процесі роздачі деформуючими елементами 7, 8, 9, ділянка, що має перепади товщини стінки, практично не деформується, а та незначна деформація ($e_2 - e_1$) використовується тільки для пластичного деформування мікронерівностей поверхневого шару. Це значно знижує похибки обробки.

Окремим напрямком по підвищенню точності обробки нерівножорстких деталей, що мають значний перепад жорсткості у поперечному перерізі (рис. 12) є розроблений спосіб деформування різнотовщинних заготовок, по якому пластична деформація локалізується на пластичних ділянках, а ділянки з більшою товщиною стінки залишаються жорсткими недеформованими.

Застосування розробленого способу обробки з використанням зворотного ходу інструмента, згідно якого, заготовка деформується в пружній області і тільки поверхня отвору деформується пластично, не спотворює форму отвору, а навпаки – поліпшує його точність за рахунок зниження та вирівнювання висотного параметра шорсткості R_z .

Третім напрямком підвищення точності обробки при ДПР є усунення зовнішніх факторів, що спотворюють осесиметричність деформування заготовки.

До таких факторів можна віднести неспіввісність інструмента та заготовки, що ліквідується наступними конструкторсько-технологічними прийомами, розробленими на основі виконаних досліджень.

Вибором оптимальної схеми протягування, що дозволяє не тільки стабілізувати течію матеріалу в осередку деформації, а і створити умови базування, що дозволяють виключити неспіввісність інструмента та заготовки.

Одним з таких шляхів поліпшення базування при деформуванні тонкостінних деталей за схемою розтягнення є новий спосіб (рис. 18). Відповідно до нього, на стержень протяжки 1 розмішують із можливістю відносного осьового переміщення додатковий конічний елемент 2, призначений для з'єднання стержня з вільним кінцем заготовки 3. При переміщенні деформуючих елементів 4 і 5 через заготовку відбувається її роздача.

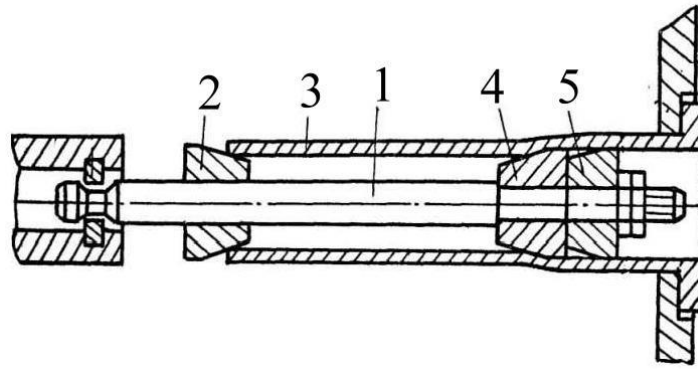


Рис. 18. Новий спосіб роздачі, що усуває неспіввісність базування.

При цьому додатковий конічний елемент своєю зовнішньою поверхнею контактує із внутрішньою поверхнею вільного кінця деталі. Введення додаткового елемента дозволило забезпечити співвісність інструмента і оброблюваної заготовки.

Також забезпечити мінімальне відхилення осей інструмента та оброблюваної заготовки можна за рахунок розробленого способу з так званим зустрічним деформуванням (рис. 19).

Згідно цього способу деформування заготовки здійснюється двома ідентичними деформуючими елементами 1 і 2 одночасно з обох торців. Ідентичні деформуючі елементи переміщуються назустріч і співвісно один одному по спільній осі 3. Цей спосіб має безсумнівні переваги у порівнянні із відомою схемою стиснення: зменшує похибки на ділянках, прилеглих до торців, поліпшує умови базування заготовки 4, виключає дію зовнішнього збурюючого навантаження, осьової сили на опорний торець, а також скорочує трудомісткість обробки.

Також поліпшує базування з боку внутрішньої поверхні використанням на деформуючих протяжках передніх і задніх направляючих. Їх застосування особливо ефективно в тих випадках, коли передня направляюча контактує з необробленою поверхнею за рахунок пружності в радіальному напрямку, а задня – з обробленою поверхнею отвору.

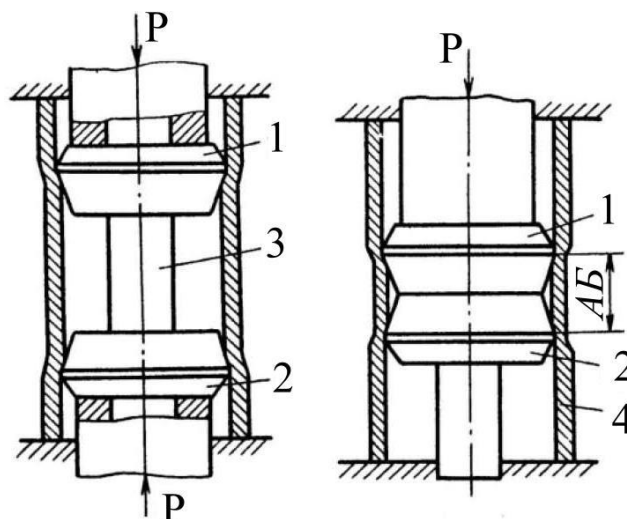


Рис. 19. Новий спосіб зустрічного деформування

При деформуванні за схемою стиснення поліпшує умови базування з боку зовнішньої поверхні застосування пружних розсувних опор. Це дозволяє усунути неспіввісність інструмента та заготовки при роздачі тонкостінних заготовок зі значними деформаціями отвору.

Неоднорідність механічних характеристик матеріалу деталі, що також спотворює осесиметричність деформації, усувається додатковим стабілізуючим відпалом.

Вплив ваги інструмента та деталі на процес деформування усувається за рахунок роздачі на вертикальних пресах, або використанням спеціальних опор і пристроїв, що супроводжують і підтримують інструмент у процесі його переміщення через заготовку.

Для усунення похибок форми зовнішньої поверхні розроблена нова схема роздачі, відповідно до якої необхідна сумарна деформація здійснюється в парне число проходів, причому після першого проходження змінюється опорний торець, причому осьову силу протягування підтримують постійною на кожному проході.

Представимо дані про шляхи забезпечення точності, деталей оброблених ДПР у вигляді схеми (рис. 20).



Рис. 20. Технологічні варіанти забезпечення точності обробки

Така схема дозволяє залежно від наявного обладнання, розмірів і технічних вимог до деталей використовувати розроблені положення для вибору оптимального шляху досягнення необхідної точності.

У цьому розділі наведено результати промислового впровадження, виконаного на основі отриманих науково-технологічних результатів.

Ефективність маловідходних технологічних процесів на основі ДПР залежить від цілого ряду умов, до яких варто віднести: працездатність твердосплавних деформуючих елементів, особливо в умовах масового виробництва, можливість зниження енерговитрат на деформування, а також забезпечення необхідних параметрів якості обробленої деталі.

Проведені дослідження не тільки пояснюють причини утворення геометричних похибок оброблених деталей, і дозволяють розробити науково-обґрунтовані технологічні методи управління параметрами точності при ДПР, а і забезпечують розробку та впровадження ресурсозберігаючих ефективних технологічних процесів обробки на основі деформуючого протягування.

Виконані дослідження показали, що рекомендовані в літературі значення кута $\alpha=4-5^\circ$ у багатьох випадках є не оптимальними. Тому необхідно розробити методику оцінки на міцність робочих елементів, що дозволяє розрахунковим шляхом коректно моделювати діапазон зміни геометрії, розмірів і умов навантаження.

Нами розроблена методика, яка дозволила достовірно оцінити міцність елементів при складному напруженому стані з урахуванням масштабного фактору, неоднорідності напруженого стану стосовно до твердих сплавів, які мають різний опір при зміні знака напруженого стану.

Встановлено, що вплив кута α на міцність формуючого елемента, враховується його висотою, довжиною контакту та зовнішнім навантаженням.

Науково обґрунтовані технологічні методи по управлінню точністю використані при розробці наступних технологічних процесів на основі ДПР.

Розроблено технологічний процес обробки внутрішньої поверхні різнотовщинних заготовок хвильоводних труб з кольорових металів латуні Л63 і міді М1. Досягнення позитивного результату (викривлення осі 1 мм на 1 м довжини заготовки, максимальна похибка отвору $\delta=0,03\text{мм}$) забезпечено за рахунок використання проведених досліджень, які дозволили обрати технологічні варіанти забезпечення точності (рис. 20). Економічний ефект склав 122000 крб.

Вибір оптимальної схеми протягування, необхідної геометрії інструмента, а також режимів протягування, дозволило вирішити проблему обробки отвору в гільзах із чавунів пластичним деформуванням. Використання розробленого на основі операції ДПР технологічного процесу забезпечує одержання поверхні з поліпшеними механічними характеристиками, з технологічним мікрорельєфом обробленої поверхні, що відповідає експлуатаційному. Річний економічний ефект склав 188 крб. на 1000 деталей.

На основі проведених досліджень розроблений технологічний процес відновлення геометричної розмірної точності зношених поршневих пальців ДВС, за рахунок роздачі внутрішнього отвору деформуючим елементом.

Для реалізації операції ДПР, у виробничих умовах розроблена та виготовлена нова установка для роздачі пальців в автоматичному режимі (рис. 21). Продуктивність її 250 шт/год.

Оцінка міцності відновлених пальців показала, що їх міцність відповідає міцності нових пальців.

Розроблений технологічний процес пройшов виробничі випробування в умовах Ташкентського ОРМЗ і впроваджений на трьох підприємствах при відновленні геометричної розмірної точності зношених поршневих пальців дизелів тепловозів, автомобілів і тракторів. Річний економічний ефект склав 157000 крб при економії 89 тон металу.

На підставі результатів моделювання роздачі нерівножорсткої труби, що має жорсткі та пластичні ділянки (розділ 5), розроблена нова конструкція розширювача для буріння гірських порід, що дозволяє здійснити багаторазове відновлення зношеного розширювача за рахунок роздачі його внутрішнього отвору деформуючим елементом. Ремонтопридатна конструкція розширювача і режими його відновлення пройшли виробничі випробування та впроваджені в умовах Норильської комплексно-розвідувальної експедиції. Річний економічний ефект склав 38000 крб.

Розроблено конструкцію комбінованої протяжки для обробки отворів у втулках із сірого чавуну. Передбачуваний економічний ефект від її впровадження на заводі по виробництву рульової гідромеханіки НВП «Радій», м. Кропивницький складе 1631 гривня на 1000 деталей.

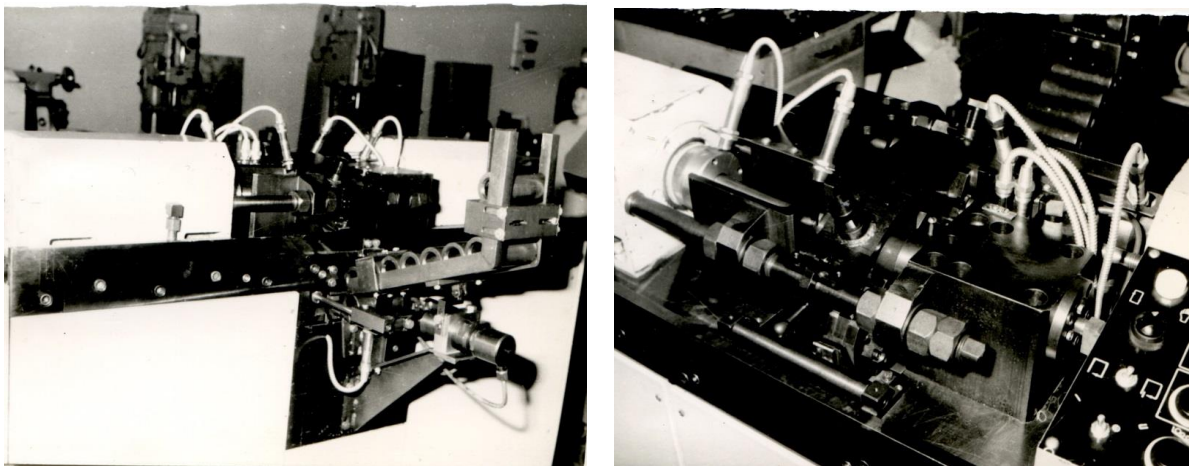


Рис. 21. Обробка поршневих пальців А01 у виробничих умовах

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті виконаних теоретично-експериментальних досліджень обґрунтована та вирішена науково-технічна проблема, що має важливе народногосподарське значення: створення наукових основ технологічного управління параметрами точності деталей, оброблених деформуючим протягуванням, які полягають в розробці математичних та експериментально-аналітичних моделей, що забезпечують встановлення причин утворення геометричних похибок та шляхів технологічного управління їх величиною, визначення особливостей деформування різнотовщинних заготовок та обробці деталей з малими натягами, а також розробці науково-обґрунтованих схем, способів протягування, інструментів

та технологічних рекомендацій, що забезпечують необхідну точність обробки. Більш детально основні висновки по роботі можна сформулювати в такий спосіб:

1. Розроблена математична модель осередку деформації при деформуючому протягуванні, яка дозволила встановити шляхом комп'ютерного моделювання закономірність течії матеріалу у осередку деформації: у зоні контакту процес деформування носить стійкий характер, а у позаконтактних зонах має явно виражений нестійкий характер. На підставі цього обґрунтоване важливе науково-технологічне положення: інтенсивне утворення похибок форми отвору деталі відбувається у позаконтактних зонах осередку деформації.

2. На підставі експериментального дослідження осьових деформацій оброблених заготовок встановлені причини утворення похибок в зоні контакту, які обумовлені варіацією осьових деформацій ділянок різнотовщинних в окружному напрямку заготовок. Це дозволило розробити аналітично-експериментальну модель викривлення осі оброблених деталей, на основі якої встановлені технологічні шляхи управління величиною цієї похибки, що дозволило зменшити її величину в 1,5-2 рази.

3. Розроблено математичну модель деформування заготовки з вихідною різнотовщинністю в окружному напрямку. Установлено зв'язок між деформацією отвору і кутовим розміром пластичної області φ_0 в залежності від вихідної різнотовщинності заготовки та її механічних властивостей. Результати численного моделювання дозволили визначити мінімально необхідну деформацію, яка забезпечує пластичне деформування всього об'єму заготовки, що дозволило зменшити брак оброблених деталей по параметру граничних деформацій з 17 до 3%.

4. При використанні розробленої моделі осередку деформації визначено його геометричні параметри: довжину позаконтактних зон та довжину ділянки контакту. Показано, що довжину контакту необхідно розраховувати по двох моделях осередку деформації, одна із яких враховує вплив висоти напливу, що виникає в локальній зоні пластичного деформування. При контактному тиску, який менший за критичний, використовується модель без врахування висоти напливу, у цьому випадку спостерігається збіг розрахункових значень із експериментальними; при досягненні контактним тиском критичного значення, розрахунок довжини контакту необхідно виконувати по моделі, що враховує висоту напливу.

5. За допомогою розробленої моделі осередку деформації виконано аналіз впливу режимів протягування та геометрії інструмента на загальну потужність формоутворення W та на її складові: потужності тертя – W_{mp} ; потужності на утворення позаконтактних зон $W_{e.3}$; потужності деформування на контактній ділянці – W_2 . Установлено, що величина відносної потужності W_{mp}/W інваріантна до режимів протягування та розмірів заготовки, і визначається тільки коефіцієнтом тертя та кутом α . Науково обґрунтовані шляхи технологічного управління енерговитратами на формоутворення через зміну технологічних факторів, що впливають на її складові, що дозволило

знизити енерговитрати на процес на величину до 50%.

6. На підставі експериментального дослідження деформацій оброблених заготовок встановлено:

- із збільшенням товщини стінки укорочення заготовки переходить у подовження, що обумовлено спільним впливом контактного тиску і схеми протягування;
- при досягненні контактним тиском критичного значення якісно змінюється схема формоутворення - укорочення заготовки переходить у подовження; при критичному контактному тиску її довжина не міняється;
- величина критичного контактного тиску визначається тільки властивостями оброблюваного матеріалу і залежить від товстостінності, кута α і натягу на елемент, що дозволяє забезпечити його наявність за рахунок зміни цих факторів;
- розроблено інженерну методику визначення кута α , якій забезпечує незмінність довжини заготовки в процесі її роздачі;
- при роздачі заготовок деформуючими елементами з кутом $\alpha > 6^\circ$, коли контактний тиск досягає критичного значення, змінюється відомий характер залежності контактного тиску від натягу a , тобто збільшення a приводить до росту контактного тиску;
- вплив матеріалу на зміну осьових розмірів заготовки та довжину контакту необхідно враховувати у випадку, коли контактний тиск досягає критичного значення.

7. Запропоновано спосіб протягування нерівножорсткої заготовки з гарантованою локалізацією пластичної деформації за рахунок створення в ній жорстких і пластичних ділянок та розроблена теоретична модель деформування такої заготовки, що забезпечує можливість деформування деталей зі значним перепадом товщини стінки в поперечному перерізі.

8. Встановлено особливості деформування виробів з малими натягами. Показано, що роздачу деталей із кінцевою товщиною стінки із чавунів необхідно здійснювати з малими пластичними деформаціями поверхневого шару отвору при відсутності їх поблизу зовнішньої поверхні. Розроблено схему деформування з використанням зворотного ходу інструменту, що реалізує цю умову. Визначальним режимним параметром для досягнення необхідної точності при деформуванні з малими натягами є величина сумарної пластичної деформації, що обмежується необхідною точністю форми отвору, а при обробці виробів з напівкрихких матеріалів необхідною точністю та ресурсом пластичності оброблюваного матеріалу.

9. Виділено та систематизовано основні види геометричних похибок заготовок, оброблених деформуючим протягуванням. Експериментально встановлено вплив режимних факторів обробки та геометрії інструмента на величину геометричних похибок, що дозволило підтвердити висновки, отримані за допомогою розроблених теоретичних моделей по визначенню причин утворення геометричних похибок оброблених деталей.

10. Визначено шляхи технологічного управління параметрами точності при ДПР. Показано можливості значного зниження похибок за рахунок: впливу зовнішніх стабілізуючих факторів, які усувають нестійкість

деформування у позаконтактних зонах; зменшення в зоні контакту варіації осьових деформацій ділянок різнотовщинних в окружному напрямку заготовок; усунення збурюючих факторів, що спотворюють осесиметричність деформування; виключення похибок форми зовнішньої поверхні заготовок. Розроблено науково-обґрунтовані способи деформування, що включають нові схеми протягування; конструкції інструментів; визначені раціональні режими протягування, що дозволяють знизити похибки обробки до 2 раз.

11. Виконані дослідження дозволили одержати аналітичні залежності для розрахунку: осьових деформацій, максимальної похибки деталі при обробці по схемах стиснення та розтягнення, розробити алгоритми технологічного управління схемою формоутворення заготовки, а також параметрами точності при розробці технологічних процесів: деформування різнотовщинних заготовок, відновлення геометричної точності зношених поршневих пальців.

12. Результати роботи пройшли промислову апробацію та лягли в основу розробки ресурсозберігаючих ефективних технологічних процесів обробки різнотовщинних заготовок стволів та хвилеводних вигинів; робочих поверхонь отворів гільз ДВЗ із чавуну; технологічних процесів відновлення геометричної точності зношених поршневих пальців ДВЗ, розширювачів для алмазного буріння та комбінованих протяжок для обробки отворів у чавунних заготовках.

СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Механіка комбінованого протягування графітовмісних чавунів. Монографія [Текст] / Э.К. Посвятенко, Я.Б. Немировський, О.В. Чернявський, П.М. Єрьомін; М-во освіти та науки України, Кіровоградський Нац. техн. ун-т. – Кропивницький, 2017. – 286 с. (сформульовано і визначені дослідження по вивченню точності деталей, оброблених з малими натягами, визначена схема осередку та його параметри при обробці з малими натягами, описані методики для визначення довжини контакту, коефіцієнта тертя)

2. Математическое моделирование процесса деформирующего протягивания [Текст] / Е.А. Балаганская, Б.А. Голоденко, Я.Б. Немировский, Ю.А. Цеханов; М-во образования Рос. Федерации. Воронеж. гос. технол. акад. – Воронеж : Воронеж. гос. технол. акад., 2001. – 194 с. (сформульовані завдання, проведені експериментальні дослідження деформацій оброблених заготовок та визначені граничні умови отриманих моделей)

3. Немировский Я.Б. Влияние условий базирования на точность деталей, обработанных деформирующим протягиванием [Текст] / Я.Б. Немировский // Вісник Тернопільського національного технічного університету: Наук. журнал. – Тернопіль, ТНТУ, 2014. – №3 (75). – С.144-157 (Журнал входить до наукометричної бази ТЕТ Inspec реєстраційний номер ISSN 1727-7108).

4. Немировский Я.Б. Технологическое обеспечение точности при обработке отверстий деформирующим протягиванием [Текст] / Я.Б. Немировский // Резание и инструмент в технологических системах:

международ. науч.-техн. сб. – Харьков : НТУ Украины «ХПИ», 2013. – Вып. 83. – С. 195–207 (Збірник входить до наукометричної бази Ulrich's Periodical's Directory (New Jersey, USA) реєстр. номер ISSN 2078-7105).

5. Немировский Я.Б. Особенности деформирующего протягивания разнотолщинных заготовок [Текст] / Я.Б. Немировский // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація : зб. наук. пр. / Кіровоград. нац. техн. ун-т. – Кіровоград, 2013. – Вип. 26. – С. 135–142.

6. Nemirovskyy Ya. Issues about limit plastic deformations of deforming of cast iron parts [Text] / Ya. Nemirovskyy, O. Chernyavskyy, P. Yeryomin, Yu. Tsekhanov // Scientific Journal of the Ternopil National Technical University. – №1(81).– Ternopil, TNTU, 2016.– pp. 88-97 (Журнал входить до наукометричної бази TET Inspec реєстраційний номер ISSN 1727-7108). (розроблені умови деформування графітовмісних чавунів)

7. Немировский Я.Б. Влияние схемы протягивания на точность изделий, обработанных деформирующим протягиванием [Текст] / Я.Б. Немировский // Високі технології в машинобудуванні: зб. наук. пр. – Харків : НТУ України «ХПИ», 2007. – Вип. 2 (15). – С. 172–179.

8. Немировский Я.Б. Восстановление калибрующих расширителей для алмазного бурения [Текст] / Я.Б. Немировский // Сверхтвердые материалы. – 2004. – № 1. – С. 64–72 (Журнал входить до наукометричної бази Web of Science реєстр. номер ISSN 0203-3119).

9. Немировский Я.Б. Анализ энергетических параметров очага деформации при деформирующем протягивании [Текст] / Я.Б. Немировский // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація : зб. наук. пр. / Кіровоград. нац. техн. ун-т. – Кіровоград, 2003. – Вип. 13. – С. 32–40..

10. Немировский Я.Б. Точность отверстий, обработанных деформирующим протягиванием [Текст] / Я.Б. Немировский // Резание и инструмент в технологических системах: международ. научн.-техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. – Вып.65. – С.111-118.

11. Немировський Я.Б. Погрешности наружной поверхности заготовок, обработанных деформирующим протягиванием [Текст] / Я.Б. Немировский // Високі технології машинобудування: международ. науч.-техн. сб. – Харьков : НТУ Украины «ХПИ», 2013. – Вып. (1) 23. – С. 130-136 (Збірник входить до наукометричної бази Ulrich's Periodical's Directory (New Jersey, USA) реєстр. номер ISSN 2078-7677).

12. Немировский Я.Б. Обеспечение геометрической точности изделий на основе изучения механики деформирующего протягивания [Текст] / Я.Б. Немировский // Резание и инструмент в технологических системах: международ. науч.-техн. сб. – Харьков : НТУ Украины «ХПИ», 2002. – Вып. 61. – С. 146–153.

13. Немировский Я.Б. Особенности процессов в контактной зоне очага деформации при деформирующем протягивании [Текст] / Я.Б. Немировский, Ю.А. Цеханов // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Харків : НТУ України «ХПИ», 2013. – Вип. 8. – С. 74–84 (Збірник входить до

наукометричної бази Ulrisc's Periodical's Directory (New Jersey, USA) реєстр. номер ISSN 2078-7499). (здобувачем визначено умови деформування в контактній зоні осередку деформації)

14. Немировский Я.Б. Геометрическая точность изделий обработанных деформирующим протягиванием с малыми деформациями [Текст] / Я.Б. Немировский, А.В. Чернявский // Резание и инструмент в технологических системах : междунар. науч.-техн. сб. – Харьков : НТУ Украины «ХПИ», 2005. – Вып. 69. – С. 201–210. (здобувачем розглянуті умови формування похибок при обробці з малими натягами)

15. Немировский Я.Б. Особенности расчета усадки отверстий при деформирующем протягивании деталей из чугуна [Текст] / Я.Б. Немировский, А.В. Чернявский, П.Н. Еремин // Високі технології в машинобудуванні: междун. науч.-техн. сб. – Харків: НТУ України «ХП», 2014. – Вып. 1(24). – С.109-121 (Збірник входить до наукометричної бази Ulrisc's Periodical's Directory (New Jersey, USA) реєстр. номер ISSN 2078-7677). (здобувачем визначені особливості усадки отвору при протягуванні виробів із чавуну)

16. Немировский Я.Б. Некоторые вопросы контактного взаимодействия при деформирующем протягивании [Текст] / Я.Б. Немировский, А.В. Чернявский // Резание и инструмент в технологических системах: междунар. науч.-техн. сб. – Харьков : НТУ Украины «ХПИ», 2006. – Вып. 70. – С. 322–331. (здобувачем описано осередок деформації при обробці з малими натягами та визначені характеристики контактної зони)

17. Немировский Я.Б. Влияние геометрии деформирующего элемента на его прочность [Текст] / Я.Б. Немировский, Л.И. Деревец, С.Б. Полотняк // Сверхтвердые материалы. – 2004. – № 2. – С. 60–65 (Журнал входить до наукометричної бази Web of Science реєстр. номер ISSN 0203-3119). (здобувачем виконаний аналіз результатів розрахунків)

18. Немировский Я.Б. Исследование изменения размеров полых осесимметричных заготовок при раздаче их деформирующим протягиванием [Текст] / Я.Б. Немировский, Ю.А. Цеханов, Е.А. Балаганская // Кузнечно-штамповое производство. Обработка материалов давлением. – 2005. – № 2. – С. 12–15. (іноземне видання, проведені дослідження по визначенню осьових деформацій оброблених заготовок)

19. Немировский Я.Б. Особенности обработки гильз ДВС деформирующим протягиванием [Текст] / Я.Б. Немировский, А.В. Чернявский // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація : зб. наук. пр. / Кіровоград. нац. техн. ун-т. – Кіровоград, 2004. – Вып. 15. – С. 425–432. (здобувачем визначені особливості формування похибок при обробці гільз із чавуну)

20. Немировский Я.Б. Відновлення поршневих пальців на основі деформуючого протягування [Текст] / Я.Б. Немировский, Л.І. Деревець // Механізація та електрифікація сільського господарства : міжвідом. темат. наук. зб. / НААН, Нац. наук. центр «Ін-т механізації та електрифікації сіл. госп-ва». – Глеваха: ННЦ «ІМЕСГ», 2003. – Вып. 87.– С. 269–278. (здобувачем розроблений технологічний процес відновлення поршневих

пальців)

21. Немировский Я.Б. Кривизна оси разнотолщинных заготовок обработанных деформирующим протягиванием [Текст] / Я.Б. Немировский, А.И. Геровский // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація : зб. наук. пр. / Кіровоград. нац. техн. ун-т. – Кіровоград, 2004. – Вип. 14. – С. 222–229. (здобувачем розроблена модель, визначено вплив режимів протягування та геометрії на кривизну осі обробленої деталі)

22. Немировский Я.Б. Применение вариационных принципов для анализа энергетических и кинематических параметров процесса деформирующего протягивания [Текст] / Я.Б. Немировский, Ю.А. Цеханов // Резание и инструмент в технологических системах : междунар. науч.-техн. сб. – Харьков : НТУ Украины «ХПИ», 2001. – Вып. 60. – С. 154–159. (здобувачем розроблена модель осередку деформації)

23. Немировский Я.Б. Пути снижения энергозатрат при деформирующем протягивании трубных заготовок [Текст] / Я.Б. Немировский, Ю.А. Цеханов, Е.А. Балаганская // Изв. Тульского гос. ун-та. Сер. Механика деформируемого твердого тела и обраб. металлов давлением. – 2003. – Вып. 1. – С. 91–100. (іноземне видання, здобувачем виконаний енергетичний аналіз та визначені шляхи управління енергозатратами)

24. Левитас В.И. Конструкционная прочность твердосплавных рабочих элементов деформирующих протяжек [Текст] / В.И. Левитас, Я.Б. Немировский, С.Б. Полотняк // Пробл. прочности. – 1994. – № 12. – С. 62–68. (здобувачем поставлена задача по розробці методики розрахунку та виконаний аналіз розрахункових результатів)

25. Цеханов Ю.А. Влияние технологических параметров деформирующего протягивания на конечные деформации заготовок [Текст] / Ю.А. Цеханов, Я.Б. Немировский // Високі технології в машинобудуванні: зб. наук. праць / Харківський держ. політехн. ун-т. – Харків, 2000. – Вип. 1 (3). – С. 281–285. (здобувачем виконаний аналіз експериментальних даних по визначенню деформації оброблених заготовок)

26. Немировский Я.Б. Анализ энергетических и кинематических параметров очага деформации при деформирующем протягивании [Текст] / Я.Б. Немировский, Ю.А. Цеханов, Е.А. Балаганская // Изв. Тульского гос. ун-та. Сер. Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением. – 2002. – Вып. 1. – С. 177–182. (іноземне видання, здобувачем виконаний аналіз розрахунків по визначенню енергозатрат та кінематичних параметрів осередку деформації)

27. Немировський Я.Б. До питання міцності поршневих пальців відновлених деформуючим протяганням [Текст] / Я.Б. Немировський, Л.І. Деревець, Ю.А. Цеханов // Механізація та електрифікація сільського господарства : міжвідом. темат. наук. зб. / НААН, Нац. наук. центр «Ін-т механізації та електрифікації сіл. госп-ва». – Глеваха: ННЦ «ІМЕСГ», 2004. – Вип. 88. – С. 142–151. (здобувачем розроблена методика по оцінці міцності відновлених пальців і виконано аналіз результатів розрахунку)

28. Немировский Я.Б. Шероховатость поверхностей трения гильз ДВС,

обработанных с использованием пластического деформирования [Текст] / Я.Б. Немировский, М.М. Потемкин, А.В. Чернявский // Трение и износ. – 1989. – Т. 10, № 3. – С. 446–451. (виконаний аналіз параметрів якості при обробці гільз ДВЗ деформуючим протягуванням)

29. К вопросу использования алмазов для изучения контактного взаимодействия инструмента с деталью при деформирующем протягивании [Текст] / А.М. Розенберг, О.А. Розенберг, Ю.А. Цеханов, Я.Б. Немировский, В.В. Кривошея // Сверхтвердые материалы. – 1984. – № 3. – С. 39–43. (оцінені похибки та розроблені умови для збільшення точності визначення довжини контакту)

30. Цеханов Ю.А. Влияние разнотолщинности заготовки на процесс ее раздачи при деформирующем протягивании [Текст] / Ю.А. Цеханов, Е.А. Балаганская, Я.Б. Немировский // Високі технології в машинобудуванні: зб. наук.пр. – Харків: НТУ «ХПІ», 2002. – Вип.1. – С. 427–431. (здобувачем розроблена модель, виконаний аналіз результатів розрахунку)

31. Розенберг О.А. Сборная твердосплавная протяжка для обработки гильз и цилиндров [Текст] / О.А. Розенберг, Я.Б. Немировский, А.В. Чернявский // Станки и инструмент. – 1986. – № 8. – С. 18–19. (розроблена конструкція деформуючої протяжки для обробки отворів в деталях із чавуну)

32. Геровский А.И. Осевые напряжения в заготовке при деформирующем протягивании по схеме с ограничением осевой деформации [Текст] / А.И. Геровский, Я.Б. Немировский // Повышение эффективности протягивания (Качество обраб.): сб. науч. тр. / Риж. политехн. ин-т; [Редкол.: Ведмедовский В. А. (отв. ред.) и др.]. – Рига : РПИ, 1990. – С. 108–114. (розроблена методика виміру осьових напружень та визначено вплив на них режимів протягування і геометрії інструмента)

33. Увеличение срока службы калибрующих расширителей для алмазного бурения [Текст] / О.А. Розенберг, Я.Б. Немировский, А.А. Бугаев, А.Ф. Полешко // Сверхтвердые материалы. – 1985. – № 6. – С. 52–57. (розробка ремонтпридатної конструкції розширювача для буріння)

34. Применение износостойких покрытий на рабочих элементах деформирующих протяжек [Текст] / О.А. Розенберг, Я.Б. Немировский, С.Е. Шейкин, З.Г. Власюк // Сверхтвердые материалы. – 1987. – № 1. – С. 36–41. (розроблена методика визначення коефіцієнта тертя)

35. Изменение размеров деталей типа втулки и труб при деформирующем протягивании по схеме растяжения [Текст] / О.А. Розенберг, А.И. Геровский, Я.Б. Немировский, Ю.А. Цеханов // Технология и автоматизация машиностроения: межвед. республ. науч.-техн. сб. – К., 1987. – Вып. 40. – С. 86–94. (проведені дослідження по визначенню деформацій оброблених заготовок)

36. Деформирующее протягивание с растяжением в производстве точных труб [Текст] / О.А. Розенберг, А.И. Геровский, Я.Б. Немировский, Г.А. Сизоненко // Вестн. машиностроения. – 1987. – № 10. – С. 42–44. (розроблено технологічне рішення по зниженню похибок при протягуванні довгих деталей)

37. Восстанавливаем поршневые пальцы [Текст] / Я.Б. Немировский,

А.И. Геровский, В.А. Наталенко, О.А. Копьев // Электрическая и тепловозная тяга. – 1987. – № 11. – С. 22–23. (розроблено техпроцес відновлення поршневих пальців дизелів 10Д100)

38. Патент № 68824А України, В24В39/02. Спосіб деформуючого протягування порожнистої вісесиметричної різнотовщинної заготовки / Розенберг О.А., Немировський Я.Б., Цеханов Ю.А. (Росія). - №109799; заявл. 31.10.2003; опубл. 16.08.2004. Бюл. №8.– 3с. (розроблені умови для локалізації пластичної деформації на тонкостінних ділянках)

39. Динамометр для измерения усилий протяжки цилиндрической детали: А.с. 1254321 СССР, МКИ G01L1/22/ Я.Б. Немировский, А.К. Геровский, О.А. Розенберг. - №3840659/24-10; заявл. 09.01.85; опубл. 30.08.86, Бюл №32.– 3с. (розроблена схема динамометра)

40. Способ обработки осесимметричных деталей: А.С. 1447649 СССР, МКИ В24В39/02/ Я.Б. Немировский, О.А. Розенберг, А.И. Геровский, Кривошея В.В., Белоцкий Н.А., Наталенко В.А., Копьев О.П. – №4207821131-27; заявл. 10.03.87; опубл. 30.12.88, Бюл. №48.– 4с. (розроблена схема роздачі зі зміною опорного торця)

41. Немировский Я.Б. Научные основы обеспечения точности изделий, обработанных деформирующим протягиванием [Текст] / Я.Б. Немировский // Сучасні процеси механічної обробки інструментами з НТМ та якість поверхні деталей машин: зб. наук. праць / НАН України. Ін-т надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля. – К., 2006. – С. 195–208. – (Сер. Г. Процеси механічної обробки, верстати та інструменти).

42. Немировский Я.Б. Математическая модель очага пластических деформаций при деформирующем протягивании [Текст] / Я.Б. Немировский, Ю.А. Цеханов, Е.А. Балаганская // Современные проблемы механики и физико-химии процессов резания, абразивной обработки и поверхностного пластического деформирования: материалы междунар. науч. конф., 14–16 мая 2002 г., г. Киев. – К. : АТМ Украины, 2002. – С. 110–112. (здобувачем розроблена математична модель осередку деформації)

43. Цеханов Ю.А. Деформирующее протягивание разнотолщинных заготовок [Текст] / Ю.А. Цеханов, Е.А. Балаганская, Я.Б. Немировский // Труды четвертой российской науч.-техн. конференции «Авиакосмические технологии». – Воронеж, ВГТУ, АКТ – 2003. – С34-39. (іноземне видання, розроблена модель по деформуванню різнотовщинної труби та виконаний аналіз розрахунків)

44. Немировский Я.Б. Восстановление изношенных деталей на основе использования процесса холодного пластического деформирования [Текст] / Я.Б. Немировский, А.И. Геровский, В.В. Кривошея // Интенсификация производства и повышение качества изделий поверхностным пластическим деформированием : тез. науч.-техн. конф. 30 мая – 1 июня – Тольятти, Куйбышев, обл. правл. ВНТО машпром, Тольяттин. политехн. ин-т – С. 70. (розробка наукового положення для побудови техпроцесів відновлення осесиметричних деталей)

АНОТАЦІЯ

Немировський Я.Б. Наукові основи забезпечення точності при деформуючому протягуванні. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.02.08 – Технологія машинобудування. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України, Київ, 2018.

У дисертації вирішена науково-технічна проблема, що полягає в розробці науково-обґрунтованих технологічних методів управління параметрами точності при деформуючому протягуванні.

Розроблена на основі енергетичних принципів математична модель осередку деформації, що дозволила визначити закономірності деформування в осередку деформації та встановити, що інтенсивне утворення похибок отвору відбувається в позаконтактних зонах осередку деформації.

Проведені експериментальні дослідження деформацій оброблених заготовок. Це дозволило розробити аналітично-експериментальну модель викривлення осі обробленої деталі.

Представлені результати вивчення деформуючого протягування різновидних заготовок.

Розроблені науково-обґрунтовані алгоритми технологічного управління параметрами точності, які використовуються при розробці технологічних процесів на основі деформуючого протягування, а також нові схеми, способи та інструменти, які зменшують похибки обробки.

Ключові слова: осередок деформації, зона контакту, позаконтактні зони, деформований стан, пластична деформація, точність, геометрична похибка.

АННОТАЦИЯ

Немировский Я.Б. Научные основы обеспечения точности при деформирующем протягивании. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.08 – Технология машиностроения. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» Министерства образования и науки Украины, Киев, 2018.

В диссертации решена научно-техническая проблема, заключающаяся в разработке научно обоснованных технологических методов управления параметрами точности, позволяющего обеспечить геометрическую точность изделий, обработанных деформирующим протягиванием.

Для заготовок с небольшой толстостенностью разработана с использованием энергетических принципов математическая модель очага деформации, состоящего из участка контакта и двух внеконтактных зон, примыкающих к нему.

Модель позволила установить закономерности деформирования в очаге

деформации и обосновать важное научно-технологическое положение: интенсивное образование погрешностей происходит у внеконтактных зонах.

Проведены экспериментальные исследования осевых деформаций обработанных заготовок, установлены причины образования погрешности в зоне контакта. Они обусловлены вариацией осевых деформаций участков разнотолщинных в окружном направлении заготовок. Это позволило разработать аналитически-экспериментальную модель искривления оси обработанных деталей.

Разработана математическая модель раздачи разнотолщинной заготовки, которая позволила установить связь между величиной раздачи отверстия и угловым размером пластической области поперечного сечения заготовки. Определены оптимальные области изменения технологических факторов, обеспечивающих отсутствие браковочных признаков у обработанных изделий.

Предложен способ раздачи с гарантированной локализацией пластической деформации за счет создания в неравножесткой заготовке жестких и пластических участков, а также разработана теоретическая модель раздачи такой трубы.

Определены кинематические, геометрические и энергетические параметры очага деформации. Показано, что протяженность контактной зоны необходимо рассчитывать по двум моделям очага деформации, которые отличаются между собой учетом влияния локальной зоны пластического деформирования.

Расчеты по разработанной модели позволили уточнить влияние режимов протягивания и геометрии инструмента на мощность формоизменения и обосновать пути управления энергозатратами на процесс.

Анализ экспериментальных исследований деформаций обработанных заготовок позволил установить, что достижение контактными давлениями критических значений качественно меняет схему формообразования – укорочение заготовки переходит в удлинение; при критических контактных давлениях длина заготовки не меняется.

Установлено, что влияние материала на изменение осевых размеров заготовки и протяженность участка контакта необходимо учитывать только при наличии критических контактных давлений в очаге деформации.

Обоснованы пути технологического управления параметрами точности при деформирующем протягивании. Показаны возможности значительного снижения погрешностей за счет: влияния внешних стабилизирующих факторов, устраняющих неустойчивость течения материала, уменьшения в зоне контакта вариации осевых деформаций продольных участков разнотолщинных в окружном направлении заготовок, устранения внешних возмущающих факторов, искажающих осесимметричность деформирования, устранения погрешностей наружной поверхности.

Разработаны научно-обоснованные алгоритмы технологического управления параметрами точности: способы деформирования, схемы протягивания, конструкции инструментов. Определены рациональные режимы протягивания, позволяющие снизить погрешности обработки.

Ключевые слова: очаг деформации, участок контакта, внеконтактные зоны, течение материала, деформированное состояние, пластическая деформация, геометрические погрешности.

SUMMARY

Nemirovsky Ya.B. Scientific principles ensure accuracy when deforming broaching. – Exercising the rights of the manuscript.

The thesis for Doctor's degree in Engineering Science of specialty 05.02.08 – Machine-building technology. – The National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named Igor Sikorsky" Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2018.

The thesis solves the scientific and technical problem in the development of science-based technological methods of control parameters of the precision when deforming broaching.

The mathematical model of deformation zone has been developed on the basis of energy principles, which allowed to determine the patterns of deformation in the deformation zone and to establish that the intense formation of errors in the hole occurs in the non-contact zones of the deformation zone.

Experimental studies of deformations of processed workpieces have been carried out. This allowed to develop an analytical-experimental model of the curvature of the axis of the machined part.

The results of the study of deforming broaching of multi-thickness billets are presented.

The scientifically grounded algorithms of technological control of precision parameters, which are used in the development of technological processes on the basis of deformation broaching, as well as new circuits, methods and tools that reduce processing errors are developed.

Key words: deformation zone, contact zone, non-contact zone, deformed state, plastic deformation, accuracy, geometric error.